

Astrofizyka cząstek

prof. dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD

Wykład X

- Astronomia neutrin
- ⇒ Eksperyment Super-Kamiokande
- ⇒ Eksperyment Ice Cube

Astronomia neutrin

Motywacja

Oczekujemy produkcji neutrin w wielu różnych procesach: produkcji i oddziaływaniu promieniowania kosmicznego, w aktywnych jądrach galaktyk (AGN), wybuchach supernowych (SN), błyskach gamma (GRB) itp.

Oczekiwane reakcje produkcji

- rozpad pionu: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- rozpad mionu: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
- wychwytywanie elektronu: $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- rozpad neutronu: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Produkcja pionów związana w szczególności z obcięciem GZK:



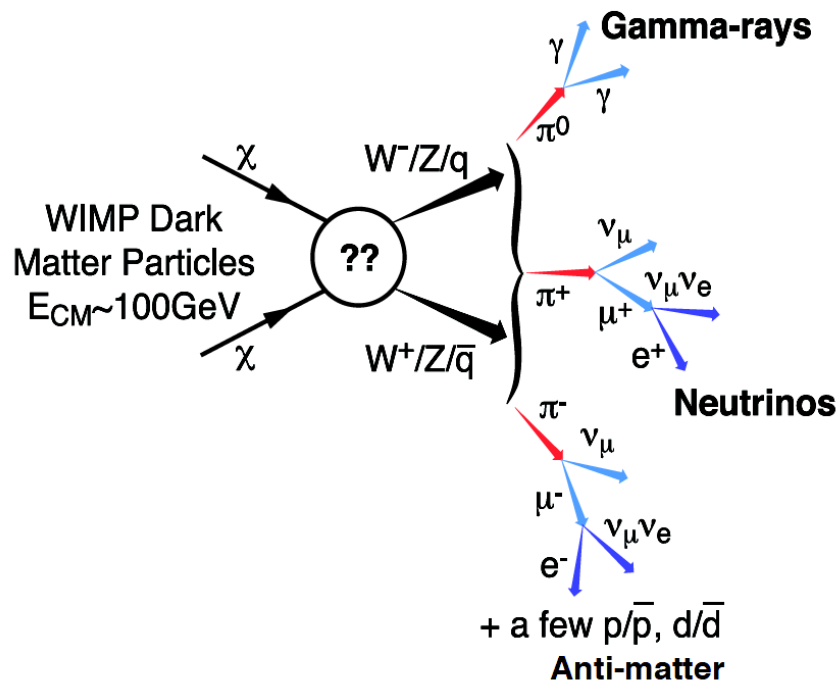
⇒ oczekujemy produkcji wysokoenergetycznych neutrin powiązanej ze **źródłami UHECR**

W zależności od źródła i mechanizmu produkcji, skład zapachowy może być różny...

Astronomia neutrin

Motywacja

Neutrino mogą też być sygnałem anihilacji cząstek ciemnej materii...



Zalety “astronomii neutrin”:

- wydostają się bez przeszkód ze źródeł
- nie odchylane w polach magnetycznych
- nie oddziałują z materią międzygwiazdową
(praktycznie) nieograniczony zasięg

⇒ możliwa identyfikacja źródeł

- niosą informację o procesie produkcji
(zapach leptonu)

Niestety, bardzo trudno je zmierzyć!...

Bardzo słabo oddziałują + mamy duże tło “lokalnych” neutrin...

Źródła lokalne

Neutrino słoneczne

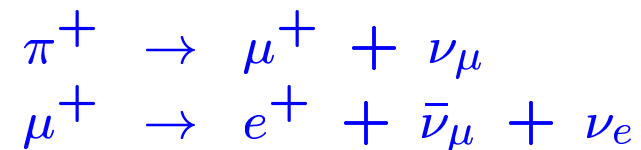
Słońce jest niezwykle intensywnym źródłem neutrin elektronowych, głównie pochodzących z procesu “**p-p**”: $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$ ($E_\nu \leq 0.42 \text{ MeV}$), trochę wyższe energie w procesie “**pep**”: $p + e^- + p \rightarrow D + \nu_e$ ($E_\nu \approx 1.44 \text{ MeV}$).

Najwyższe energie dostępne w rozpadzie 8_5B : ${}^8_5B \rightarrow {}^8_4Be + e^+ + \nu_e$
 \Rightarrow energia neutrina do **15 MeV** \Rightarrow obserwowalne detektorami fizyki cząstek...

Neutrino atmosferyczne

Pierwotne promieniowanie kosmiczne (o energiach do $\sim 10^{20}$ eV) oddziałuje z jądrami O i N w atmosferze wywołując kaskady **cząstek wtórnych**, głównie pionów π^\pm .

Neutrino powstają w łańcuchu rozpadów:



Ponieważ pierwotne promieniowanie kosmiczne jest izotropowe, oczekujemy, że także strumień **neutrin atmosferycznych** będzie izotropowy!

Sztuczne źródła

Neutrina reaktorowe

Rozszczepienie jednego jądra ^{238}U wyzwala energię ok. 200 MeV

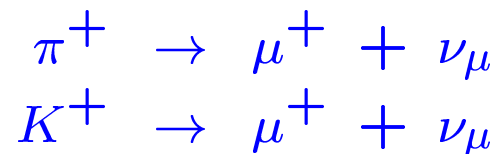
Średnio produkowane jest przy tym sześć **entyneutrino elektronowych**,
głównie w rozpadach neutronów: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Reaktor o mocy 1GW $\Rightarrow \sim 10^{20}$ rozszczepień na sekundę $\Rightarrow \sim 6 \cdot 10^{20} \nu/s$

Neutrina akceleratorowe

Potrafimy wytwarzać wiązki protonów o **wysokiej energii**, **bardzo dużym natężeniu**.

Oddziałując z gęstą tarczą, protony produkują liczne cząstki wtórne, głównie piony i kaony (jak w kaskadzie atmosferycznej). **Neutrino mionowe** powstają z rozpadów:



Poprzez ogniskowanie wiązek pionów i kaonów przed ich rozpadami, możemy uzyskać wysokiej energii wiązki neutrino lub antyneutrino...

Neutrina

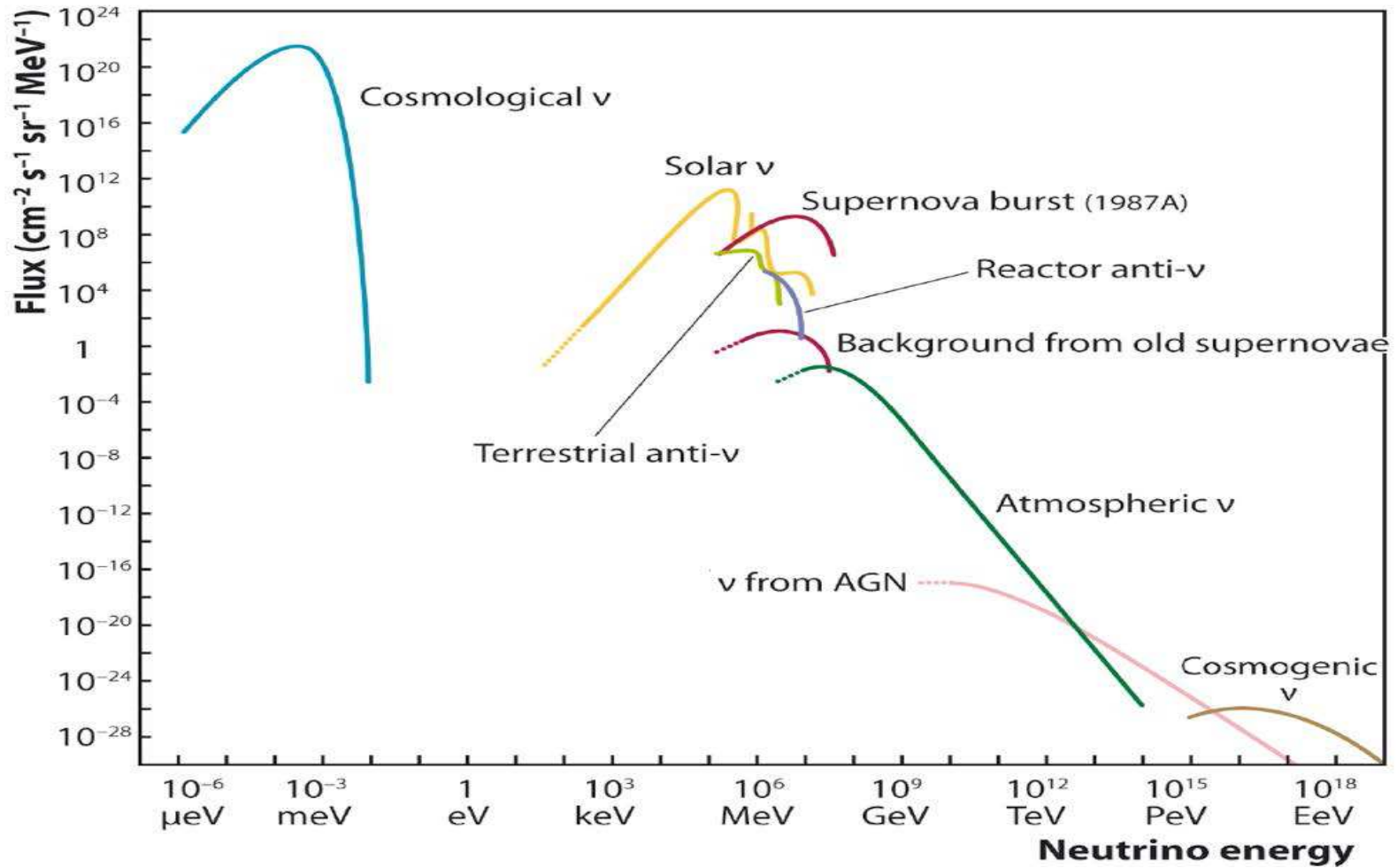
Źródła

Typ	Zapach	Energie	Strumień
Słoneczne	ν_e	$\leq 15 \text{ MeV}$	$6 \cdot 10^{10} \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (na Ziemi)
Atmosferyczne	$\nu_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$	100 MeV - TeV	$3 \cdot 10^7 \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (powyżej 10 MeV)
Reaktorowe	$\bar{\nu}_e$	rzędu MeV	$5 \cdot 10^9 \frac{1}{s \text{ cm}^2}$ (1 GW z odl. 1 km)
Akceleratorowe	$\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	rzędu GeV	10^{20} (całkowita statystyka)

Wszystkie te źródła są obecnie wykorzystywane w badaniu własności neutrin
Dokładne poznanie ich własności kluczowe dla obserwacji astrofizycznych...

Neutrino

Źródła



Super-Kamiokande

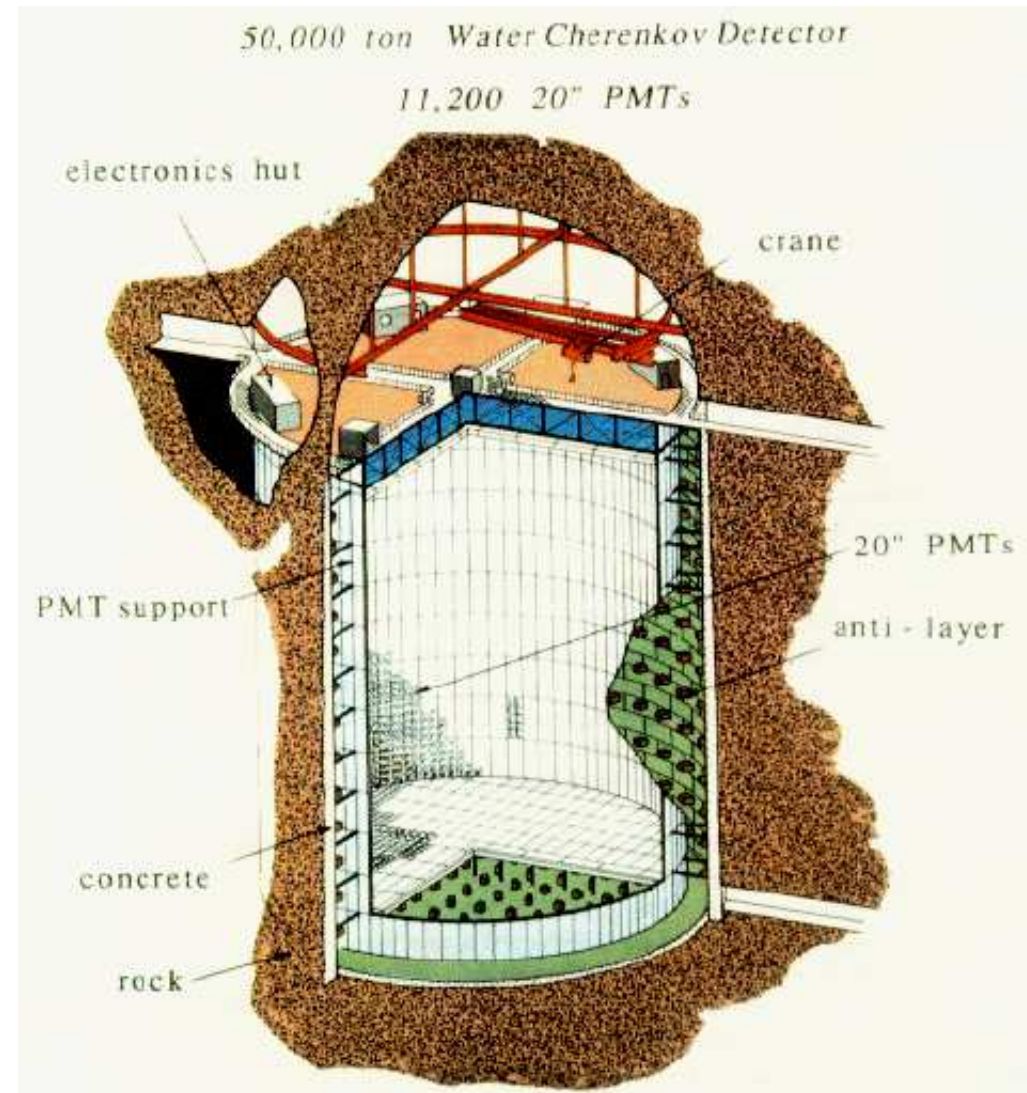
Eksperyment

Japonia, w starej kopalni, 1 km pod górą Kamioka, komora o wysokości 40 m i średnicy 40 m, wypełniona **wodą**

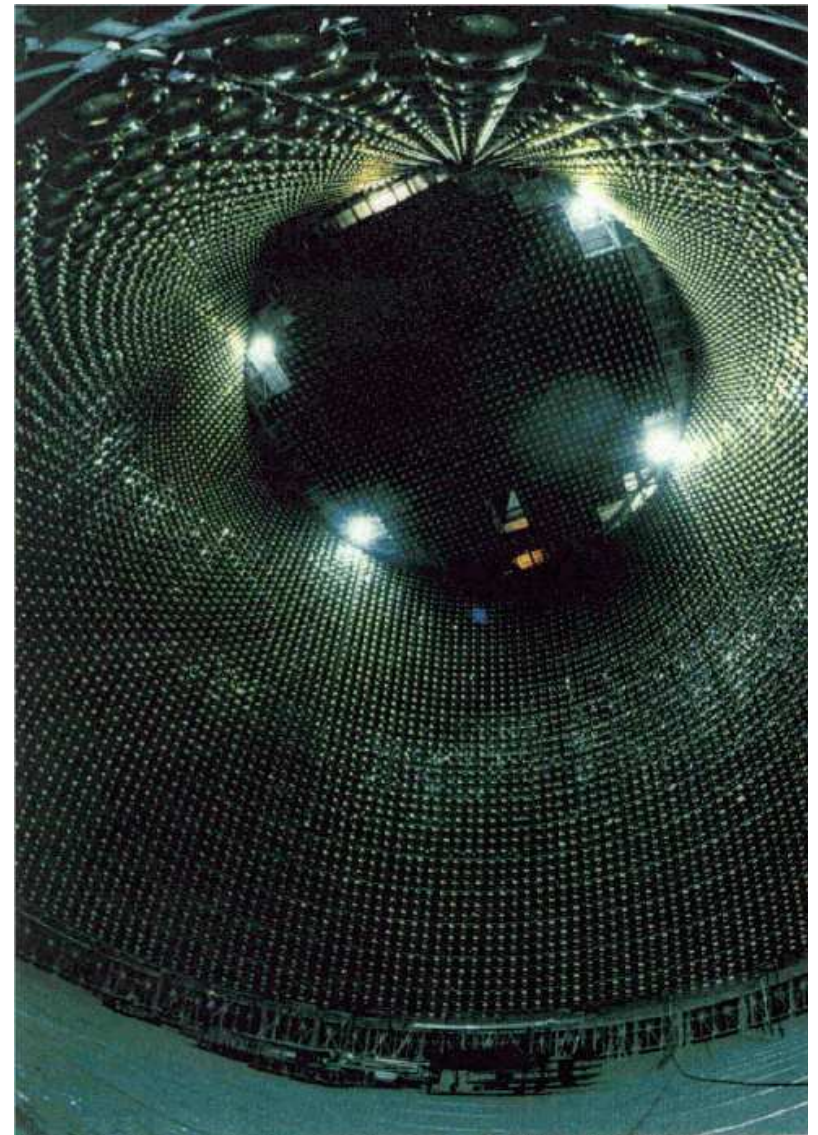
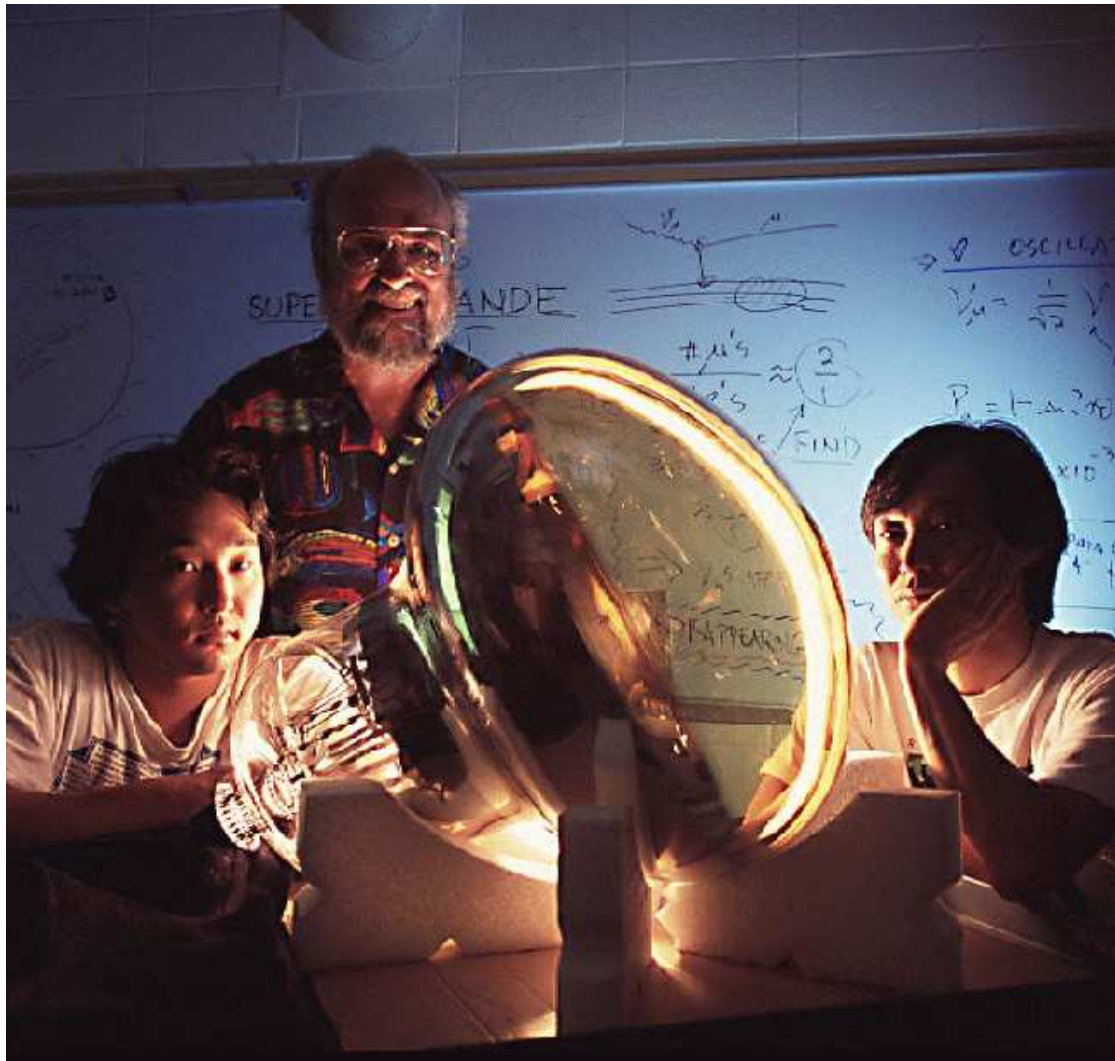
11'000 fotopowielaczy (50 cm średnicy!) rejestruje przechodzące cząstki

rejestrowane jest **promieniowanie Czerenkowa**

Jak można mierzyć tak małe sygnały ($\sim 5MeV$) w tak ogromnym detektorze?



Super-Kamiokande



Napełnianie



Super-Kamiokande

Tło

Oczekiwane około **30 przypadków** oddziaływań neutrin słonecznych **na dobę**.

Przypadki skrajnie niskich energii (rzędu **10 MeV**) - konieczność **redukcji tła**.

Główne tło: **naturalna promieniotwórczość**.

Stężenie radonu w powietrzu w kopalni $\sim 3000 Bq/m^3$

- ⇒ hermetyczne drzwi, intensywna wentylacja powietrzem zewnętrznym
- ⇒ cała komora wyłożona specjalną plastikową osłoną zabezpieczającą przed przenikaniem radonu ze skał
- ⇒ hermetyczny zbiornik, dopełniony specjalnie oczyszczonym powietrzem ($3mBq/m^3$) pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego
- ⇒ intensywne filtrowanie wody (ok. 35 t/h, czyli cały detektor w ok. 2 miesiące)

Precyzyjna **kalibracja detektora**: rozpady zatrzymujących się mionów, własny akcelerator e^- 5-16 MeV, generator DT (źródło neutronów).

Super-Kamiokande

Wyzwalanie

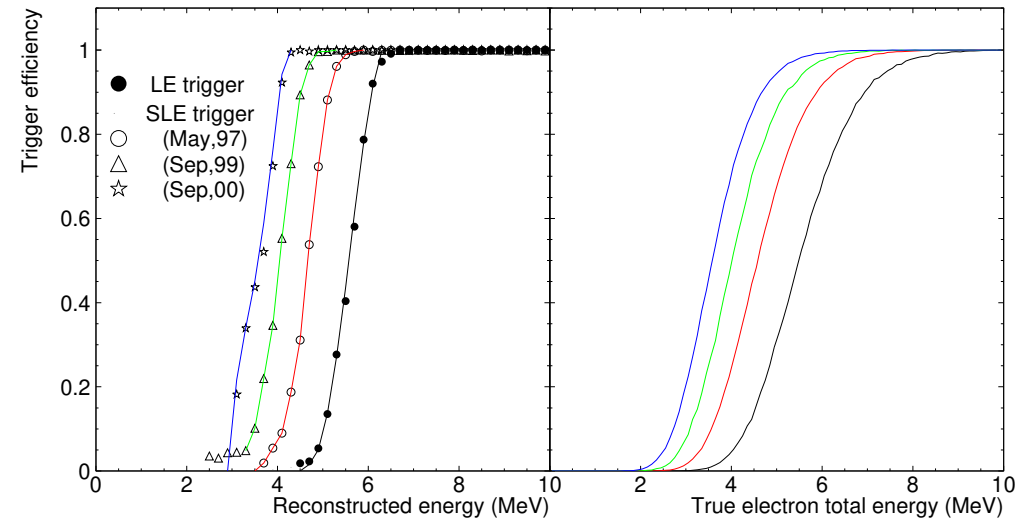
Średni poziom sygnału z pojedynczego fotopowielacza: 3.5 kHz.

Układ wyzwalania wymagał przyjęcia sygnału z wielu PMT w oknie czasowym 200 ns.

Średnia oczekiwana liczba zliczeń: ok. 8.

Różne progi wyzwalania:

- High Energy (HE) - 33 PMT
- Low Energy (LE) - 29 PMT
- Super Low Energy (SLE) - 24 PMT



Próg wyzwalania mógł być obniżany w miarę oczyszczania detektora.

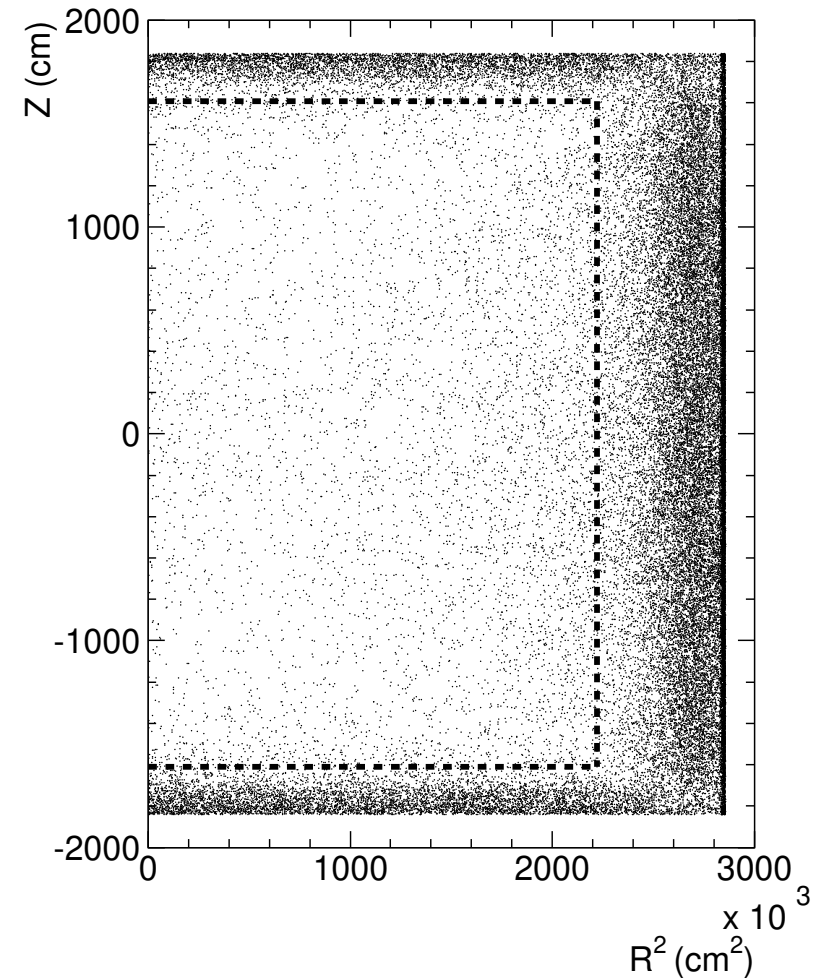
Super-Kamiokande

Wyzwalanie

Typowy rozkład rekonstruowanych wierzchołków po wstępnej selekcji przypadków niskiej energii (próg 5 MeV).

Wyraźny wkład **naturalnej promieniotwórczości** ścian komory.

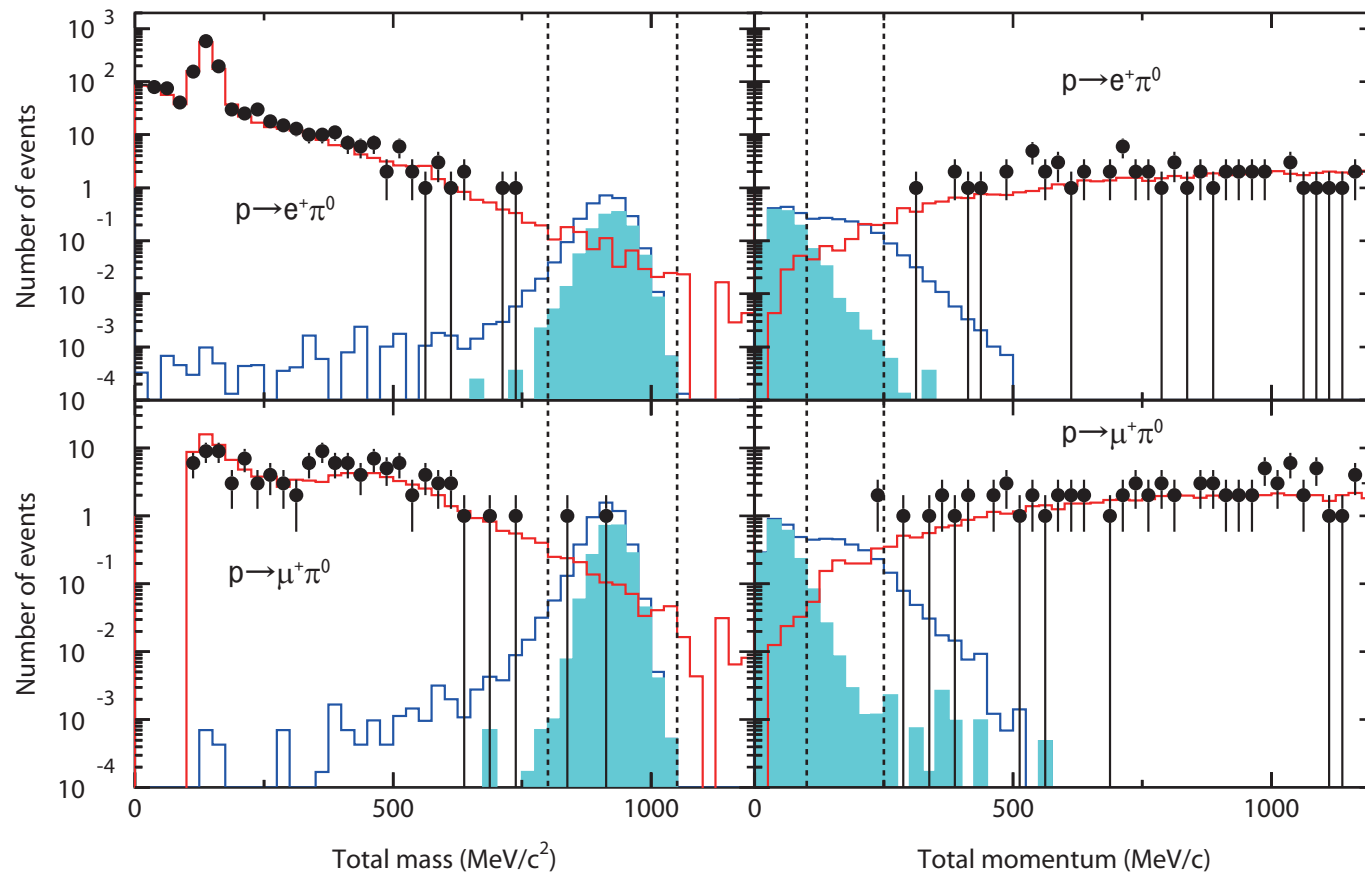
Przerywana linia: “fiducial volume”
obszar z którego wybieramy przypadki do dalszej analizy.



Super-Kamiokande

Poszukiwanie rozpadu protonu

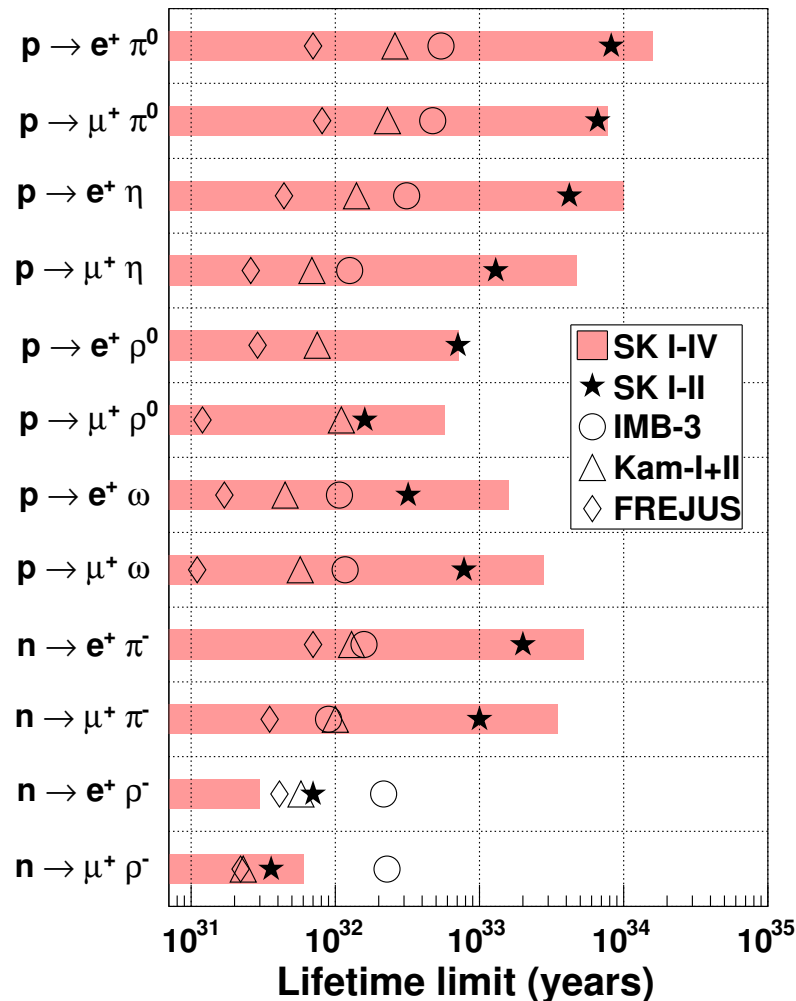
Jedna z możliwych sygnatur: $p \rightarrow e^+ \pi^0 \rightarrow e^+ \gamma \gamma$ lub $p \rightarrow \mu^+ \pi^0 \rightarrow \mu^+ \gamma \gamma$



Prównanie rozkładów całkowitej masy niezmienniczej i pędu dla **sygnału** i **tła**

Super-Kamiokande

Poszukiwanie rozpadu protonu



Najsilniejsze ograniczenie

$$\tau / BR(p \rightarrow e^+ \pi^0) > 1.6 \times 10^{34} \text{ y}$$

Przewidywania SU(5) GUT

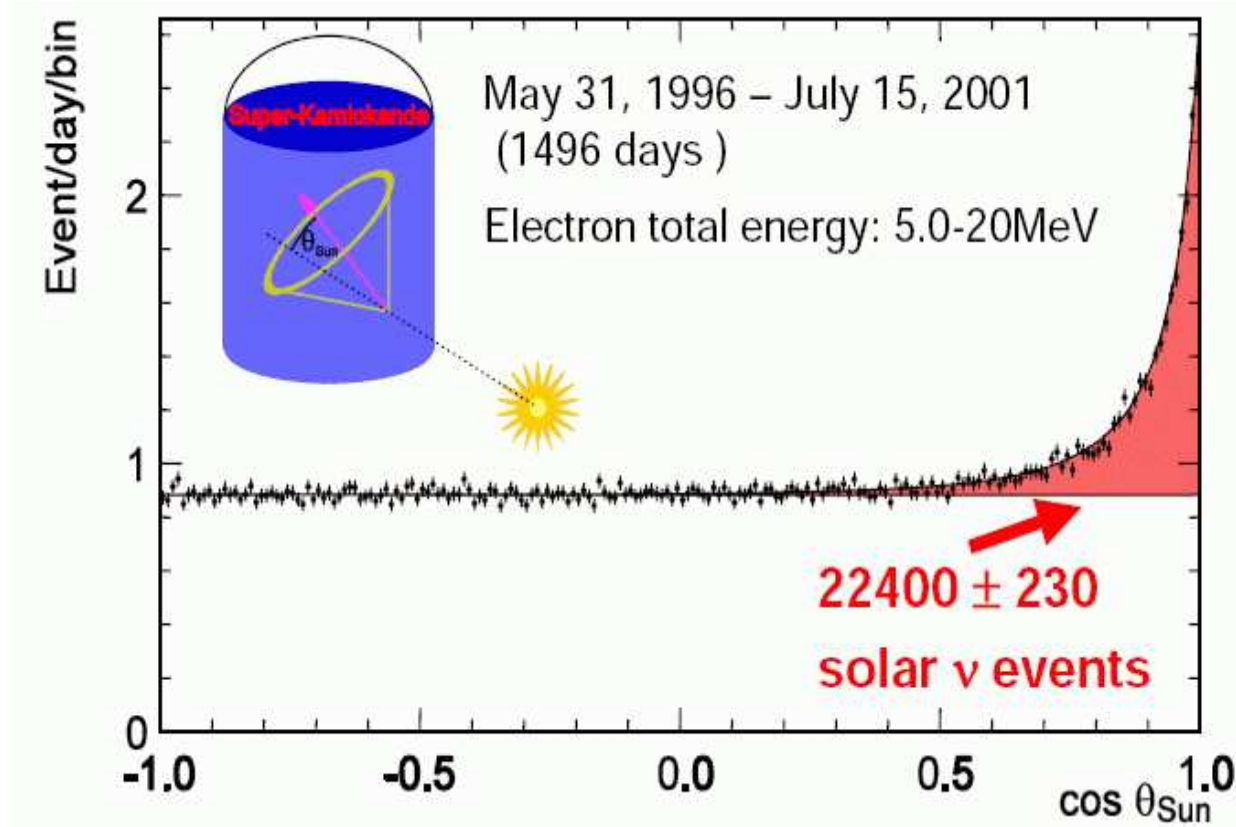
$$\tau \sim 10^{31 \pm 1} \text{ y}$$

ale inne modele dają wyższe przewidywania...

Super-Kamiokande

Obserwacja neutrin słonecznych

Oddziaływania **neutrin słonecznych** możemy odróżnić od oddziaływań innych neutrin mierząc **kąt emisji** elektronu względem **kierunku od słońca**



Zmierzono:

$$\Phi_S^{(B)} = 2.4 \pm 0.1 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

Przewidywania:

$$\Phi_S^{(B)} = 5.3 \pm 0.6 \cdot 10^6 \frac{1}{s \cdot \text{cm}^2}$$

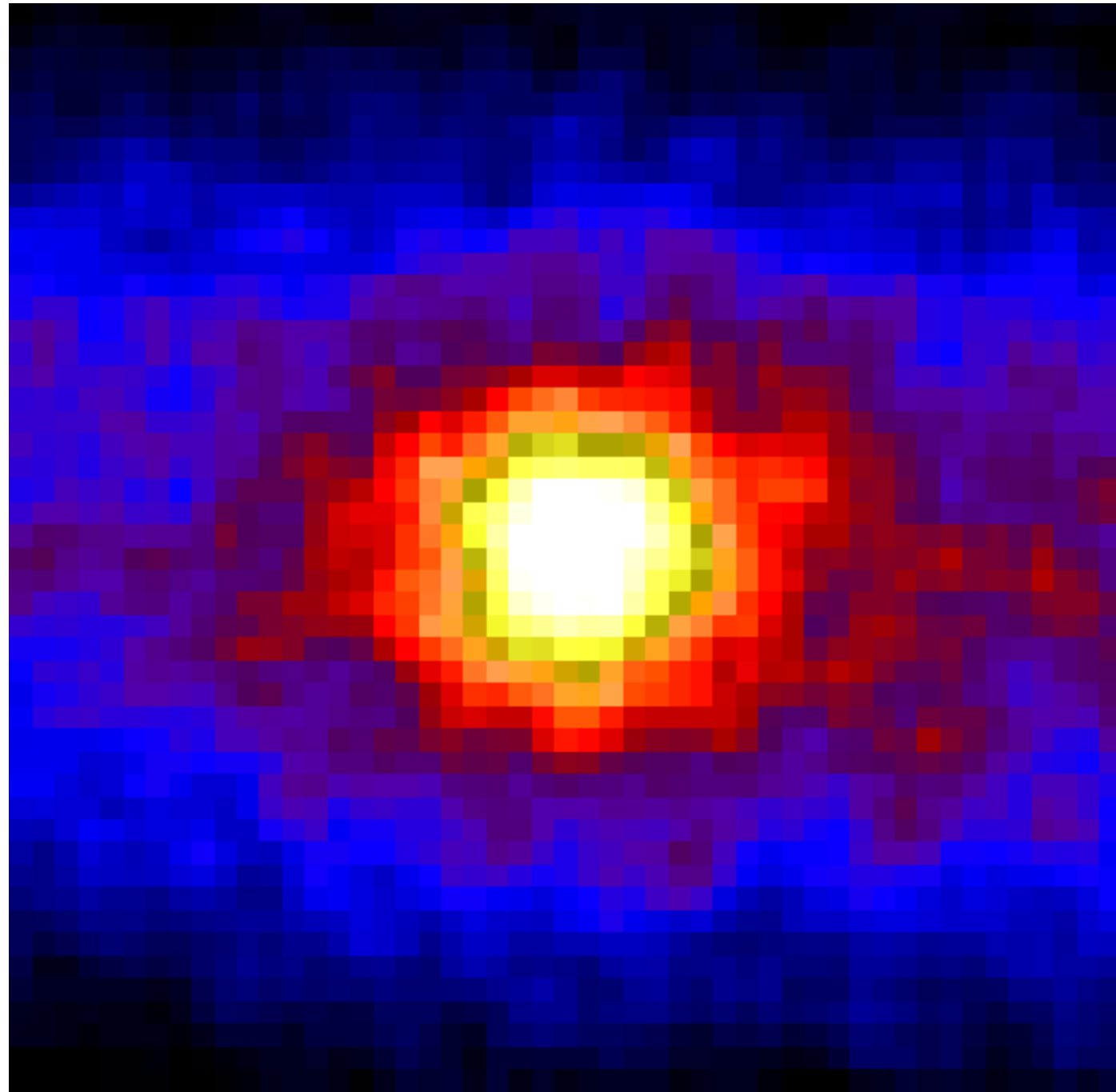
Deficyt neutrin słonecznych był już mierzony w latach '60 XX w. !

Ale zrozumieliśmy to dopiero w wieku XXI.

Super-Kamiokande

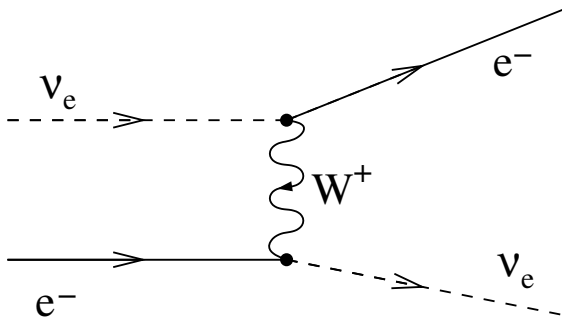
“Zdjęcie” Słońca
w “świele” neutrin

rzeczywisty rozmiar
Słońca $\sim \frac{1}{2}$ pixla

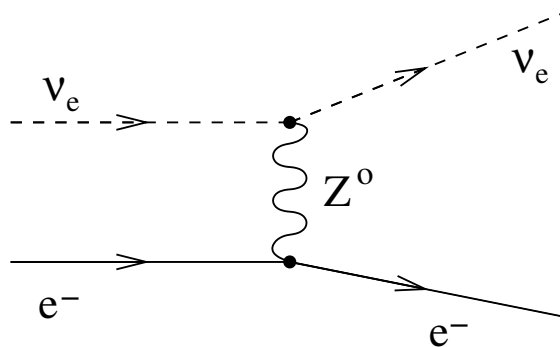
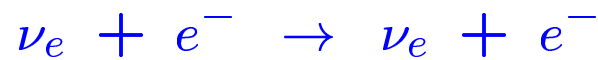


Super-Kamiokande

Neutrina słoneczne obserwowane w SK pochodzą głównie z reakcji typu **CC**

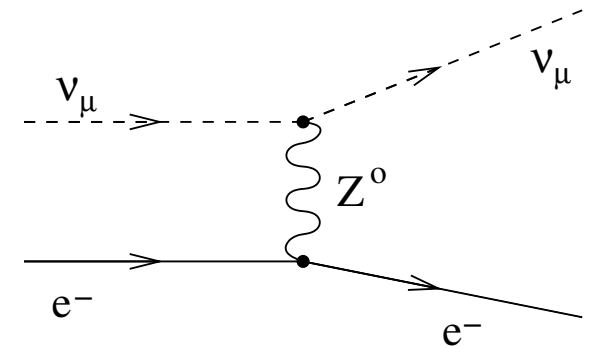


Możliwa jest też detekcja ν_e poprzez proces typu **NC**:



przekrój czynny ~ 5 razy mniejszy...

Ale proces typu **NC** możliwy jest też dla innych neutrin, np:



(także dla ν_τ)

Pomiar Super-Kamiokande:
$$\Phi^{SK} \approx \Phi_{\nu_e} + 0.154 \cdot (\Phi_{\nu_\mu} + \Phi_{\nu_\tau})$$

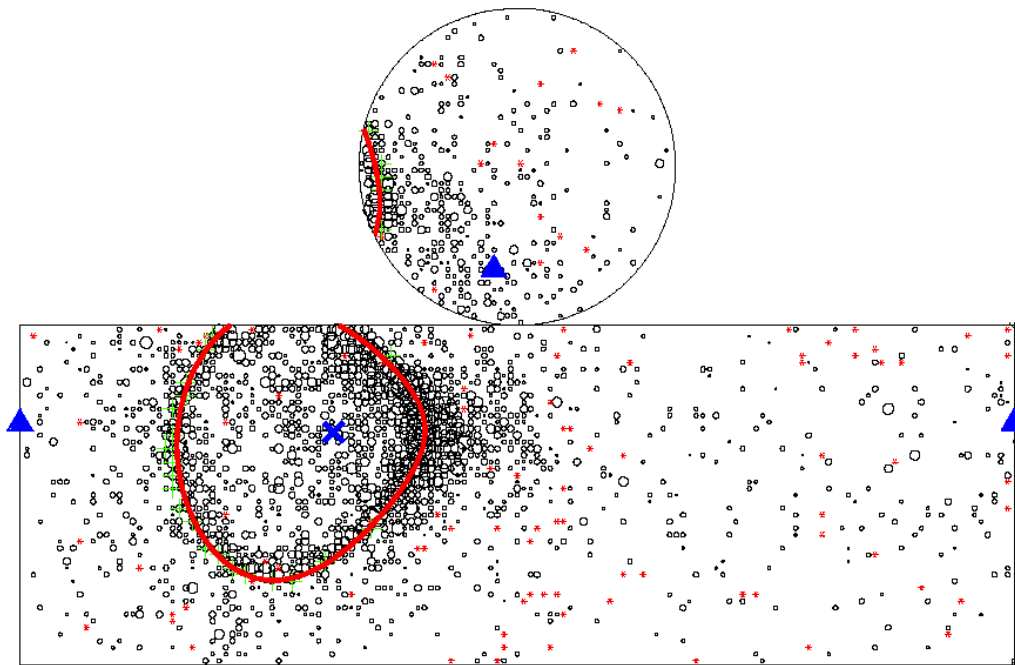
Super-Kamiokande

Dla wyższych energii potrafimy odróżnić neutrino:

Neutrino elektronowe

Przypadek $\nu_e n \rightarrow e^- p$

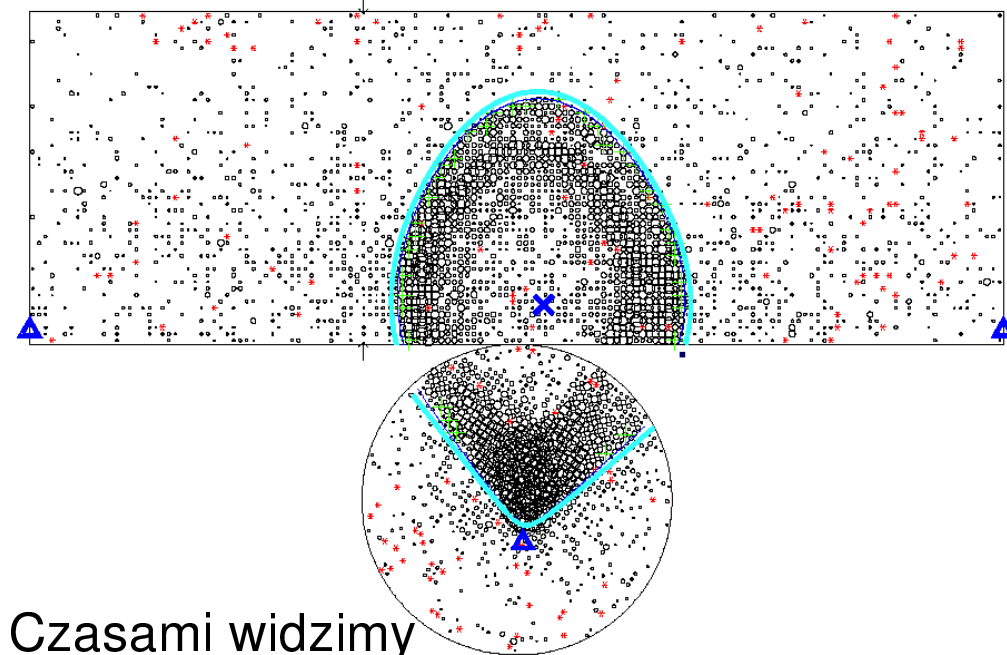
Krótki zasięg elektronu - “cienki” pierścień



Neutrino mionowe

Przypadek $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p$

Długa droga w wodzie - “gruby” pierścień.



Czasami widzimy
też opóźniony **sygnał** e^- z rozpadu μ^- .

Super-Kamiokande

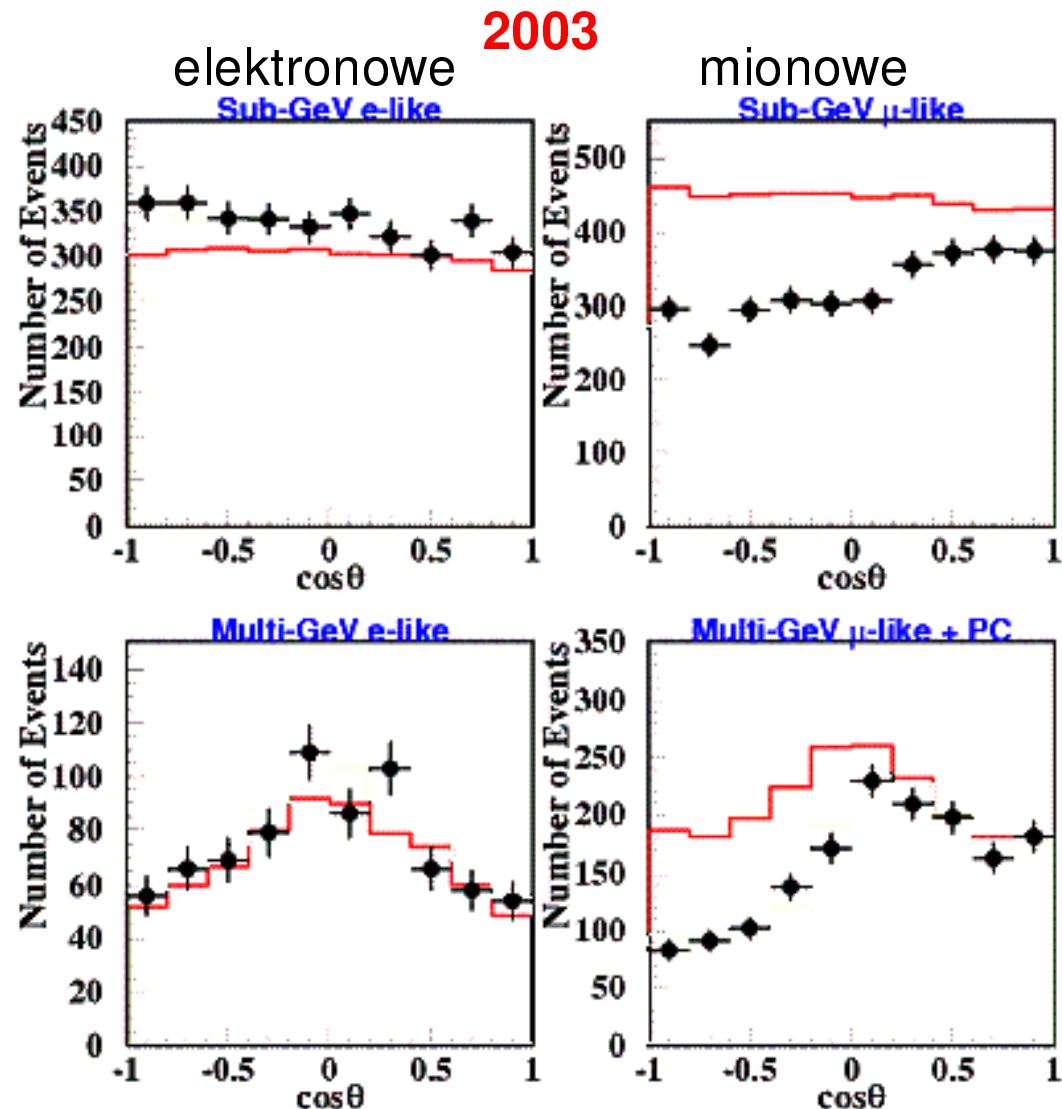
Neutrina atmosferyczne

Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

Zgodnie z oczekiwaniami **tylko** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

Wyraźnie **mniej** ν_μ lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?



Super-Kamiokande

Neutrina atmosferyczne

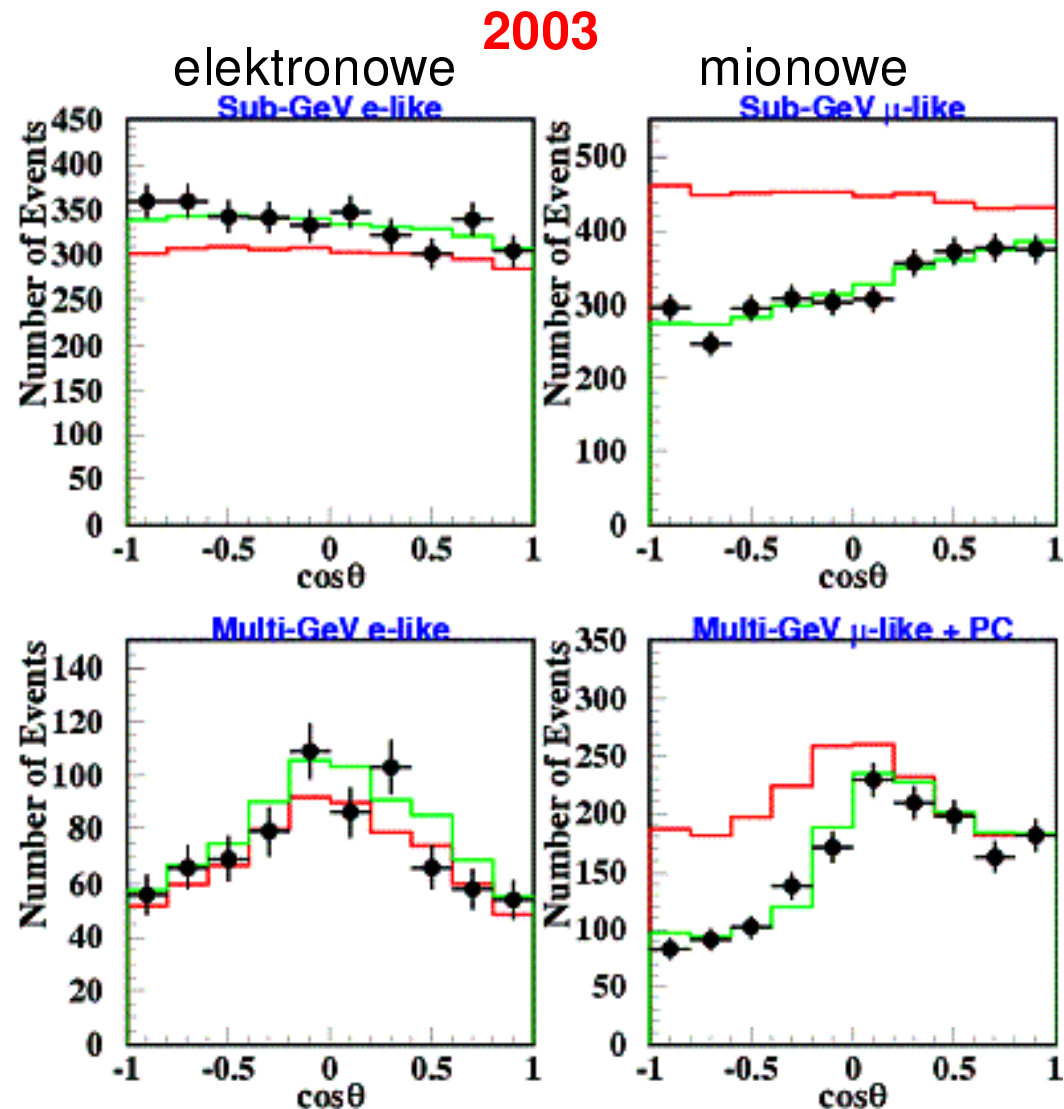
Zależność liczby neutrin **elektronowych** i **mionowych** od kierunku ($\cos \theta = 1$ gdy lecą do dołu, -1 gdy do góry) \Rightarrow

Zgodnie z oczekiwaniami **tylko** neutrin **elektronowych** leci **do dołu** ($\cos \theta > 0$) i **do góry** ($\cos \theta < 0$).

Wyraźnie **mniej** ν_μ lecących **od dołu** niż z góry !

Czy neutrina mionowe mogą “znikać” przechodząc przez Ziemię ?

Musimy przyjąć, że neutrina oscylują...

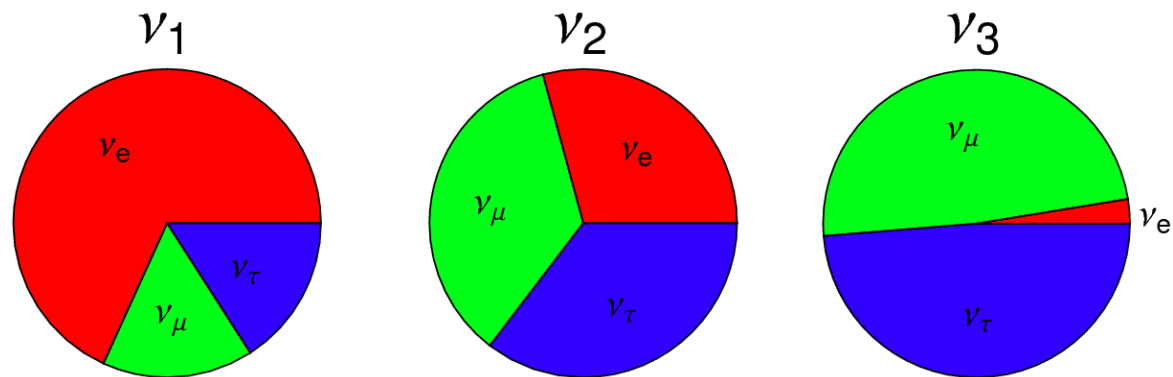


Neutrino

Oscylacje

W oddziaływaniach słabych produkowane są zawsze neutrino o określonym zapachu.

Jednak stany fizyczne (stany własne masy) neutrin są mieszankami tych stanów:



⇒ produkcja neutrino o określonym zapachu oznacza produkcję mieszanki ν_1 , ν_2 i ν_3

Gdyby neutrino nie miały masy to produkowana kombinacja (superpozycja) stanów nie zmieniałaby się w czasie ⇒ zachowanie liczby leptonowej.

Jeśli przyjmiemy, że neutrino mają masę to każdy stan porusza się z inną prędkością.

⇒ własności kombinacji zależą od przebytej odległości, zmieniają się w czasie...

Neutrino

Oscylacje dla trzech generacji

Stany zapachowe są superpozycją stanów masowych:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

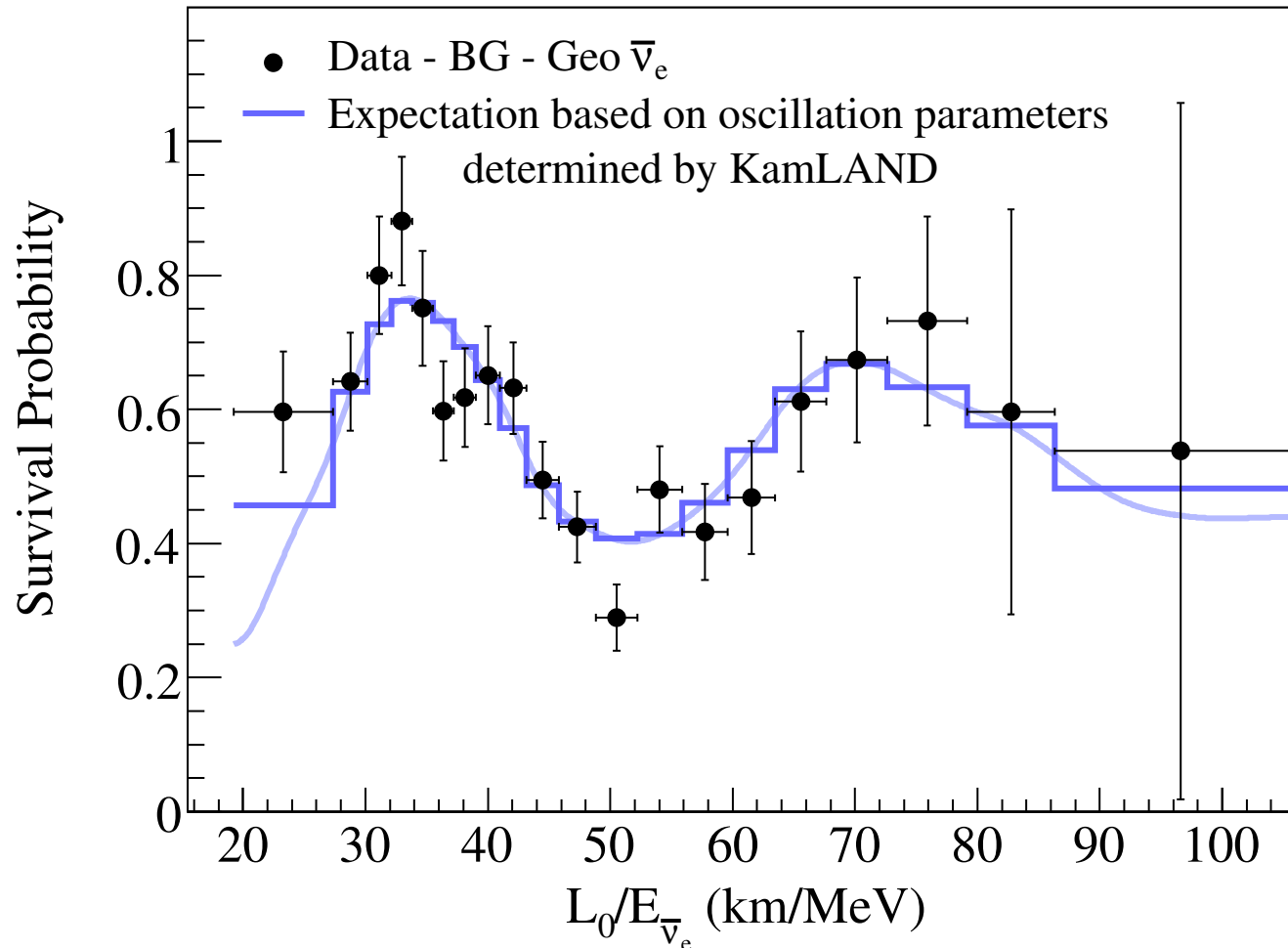
PMNS - macieź Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata
odpowiada macieży CKM mieszania kwarków

$$U = \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \\ \text{słoneczne} \\ \theta_{12} \approx 35^\circ}} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau \\ \text{atmosferyczne} \\ \theta_{23} \approx 45^\circ}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\substack{\nu_e \leftrightarrow \nu_\tau \\ \text{reaktorowe, } \theta_{13} \sim 8^\circ \\ \text{potwierdzone w 2012!}}}$$

Neutrina

Wyniki KamLAND neutrina reaktorowe

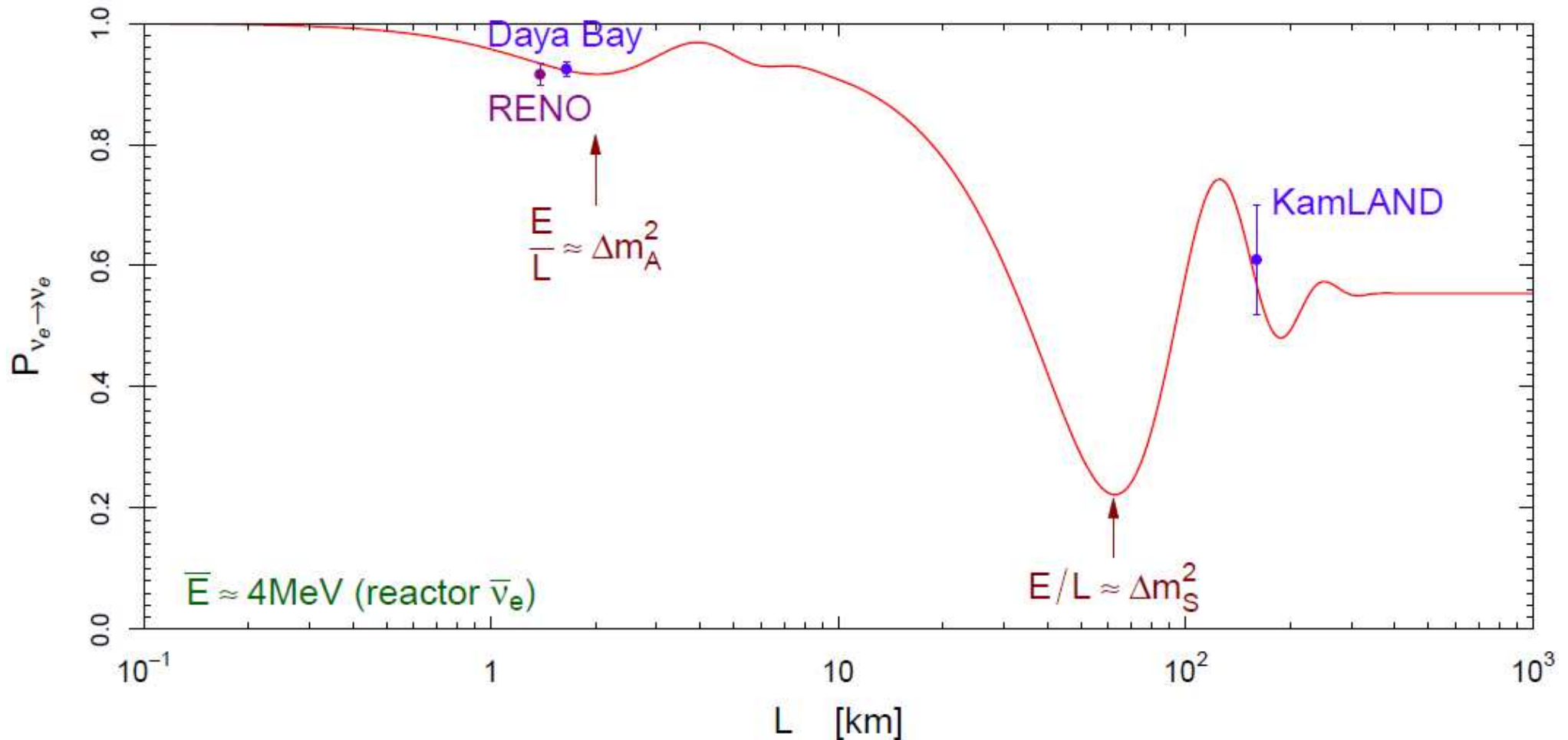
Pierwszy bezpośredni pomiar oscylacji (znikanie i pojawianie się)



Neutrino

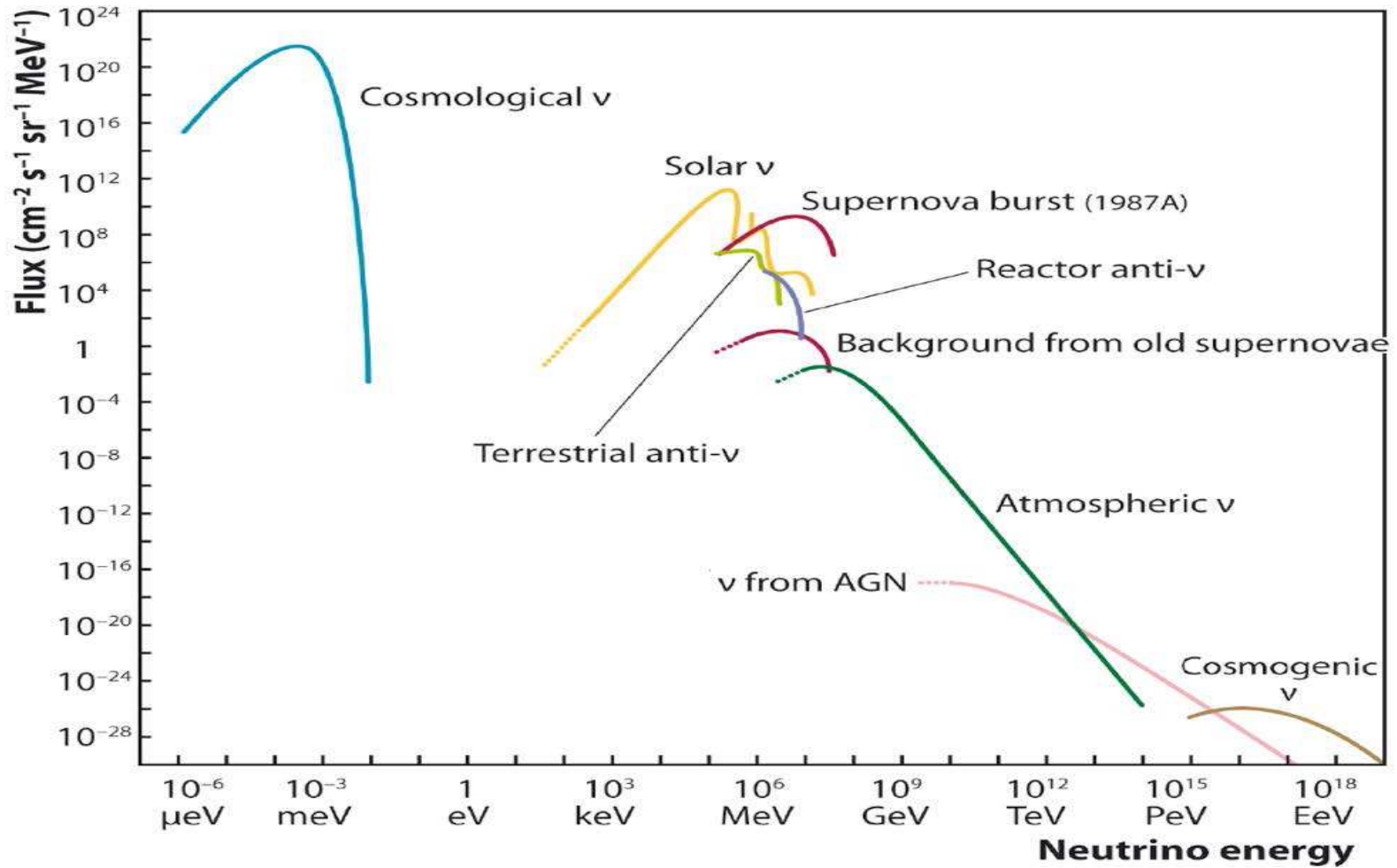
Neutrino reaktorowe

Widoczny wkład trzeciego kąta mieszania na odległościach rzędu km.



Neutrino

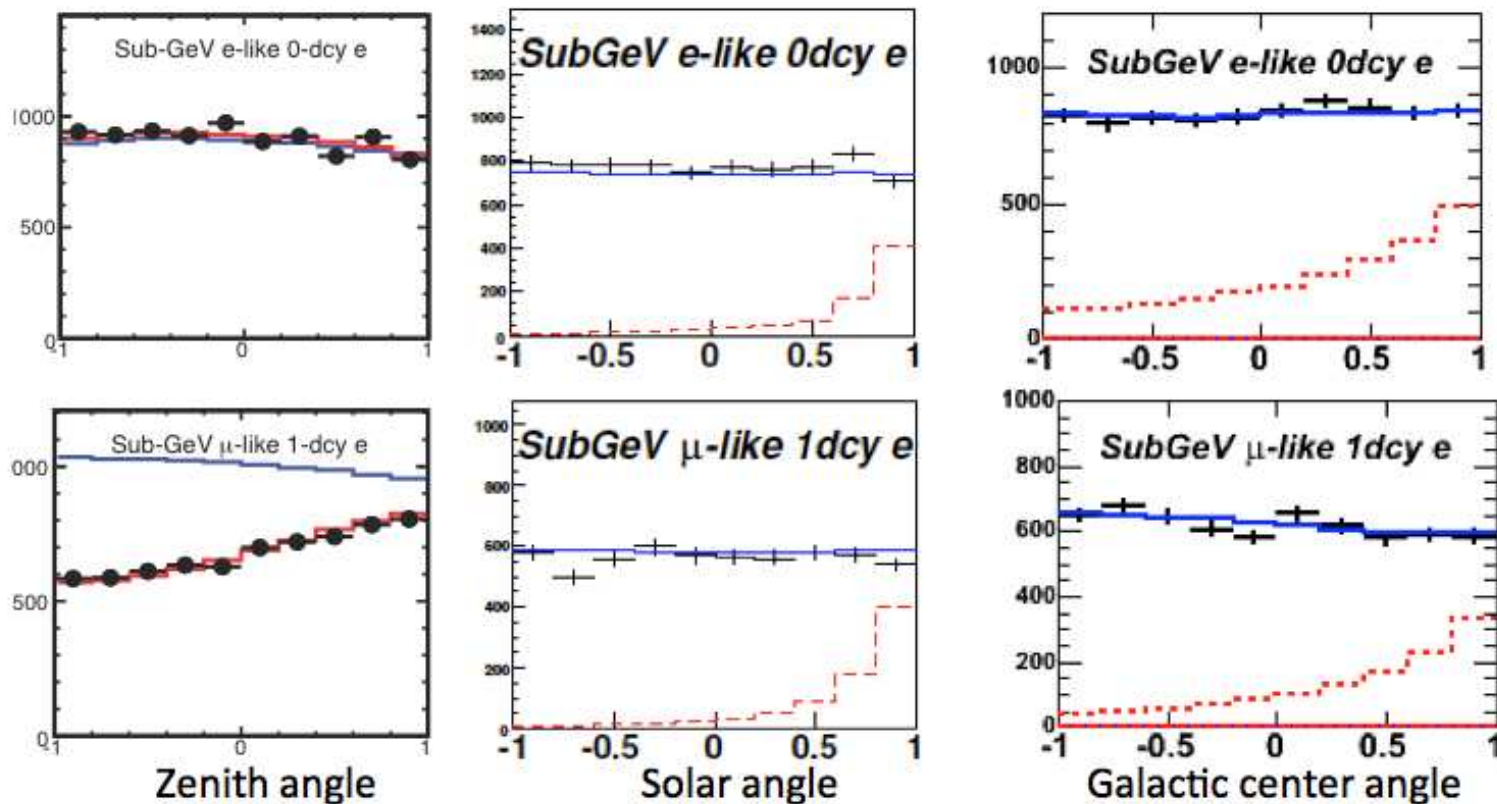
Źródła



Super-Kamiokande

Ciemna materia

Słońce produkuje neutrino do 15 MeV. Wyżej energetyczne neutrino nie powinny być skorelowane z pozycją Słońca, ani tym bardziej centrum naszej Galaktyki.

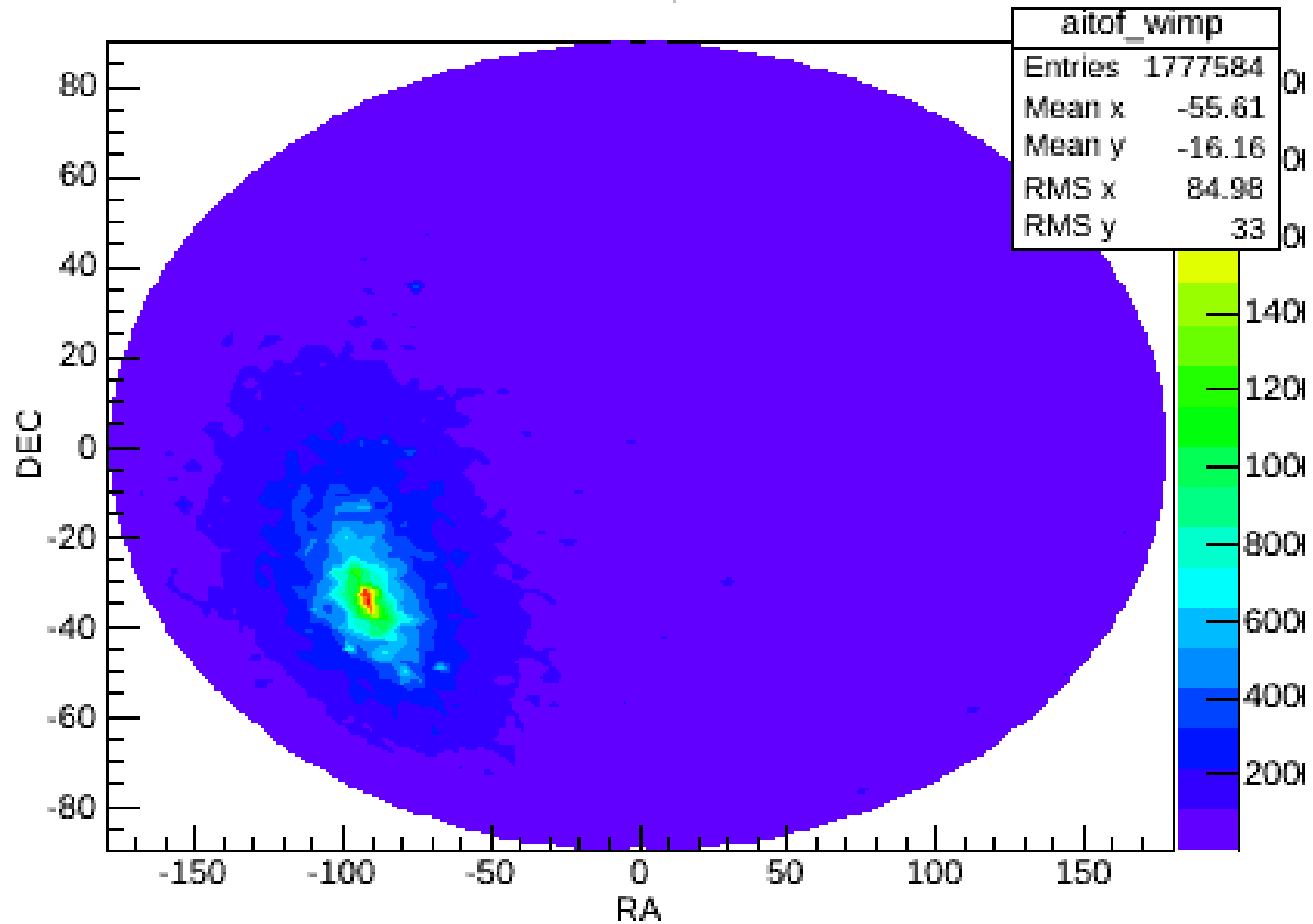


Porównanie rozkładów kątowych z **symulacją tła** oraz **anihilacją DM** w $b\bar{b}$ ($M=5$ GeV)

Super-Kamiokande

Wyniki

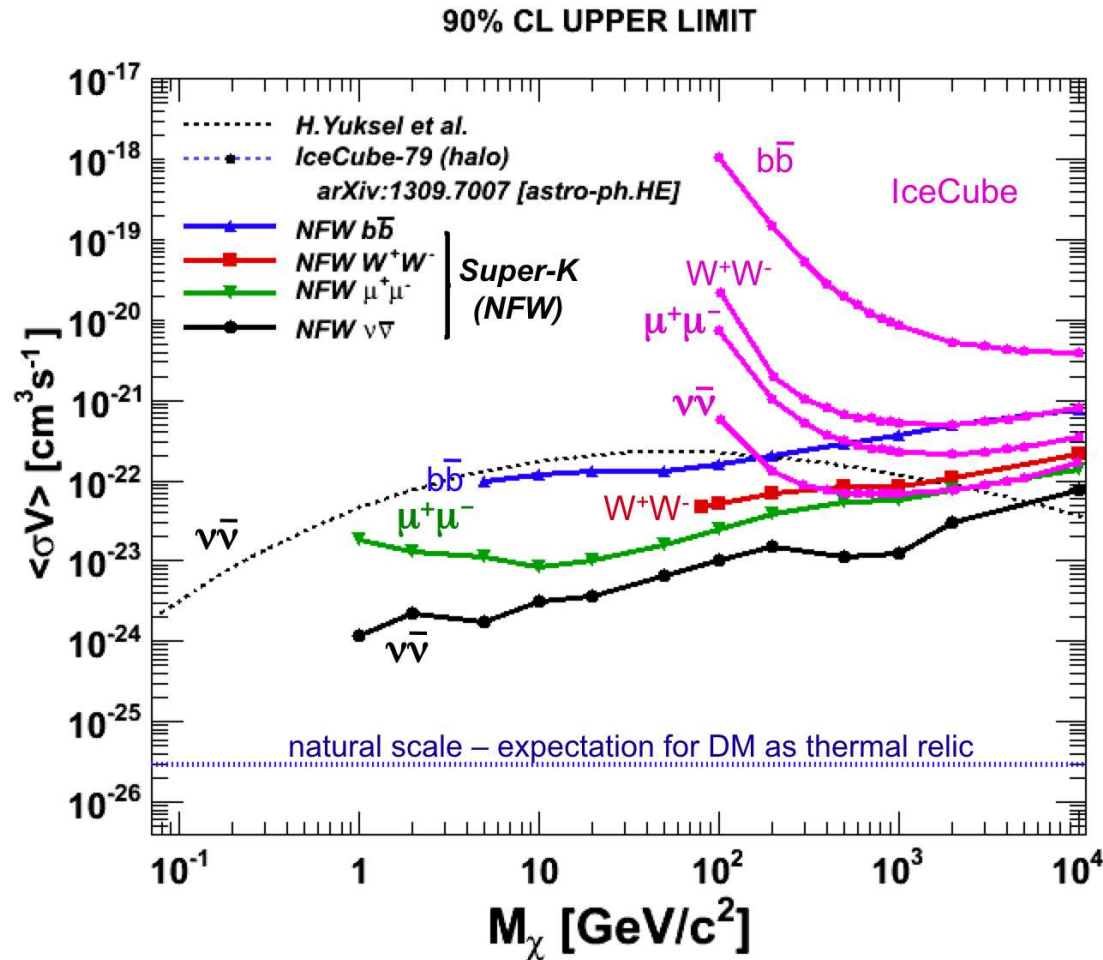
Oczekiwany rozkład (we współrzędnych galaktycznych) dla sygnału anihilacji DM



Super-Kamiokande

Wyniki

Ograniczenia z poszukiwania anihilacji DM w centrum Galaktyki



Nowe eksperymenty

Badanie neutrin o energiach powyżej TeV wymaga jeszcze **większych detektorów**

Wiele nowych eksperymentów w XXI wieku

AMANDA uruchomiona w 2000

(Antarctic Muon And Neutrino Detector Array)

677 modułów na 19 “strunach”,
1500–2000 m pod lodem (**biegun południowy**)

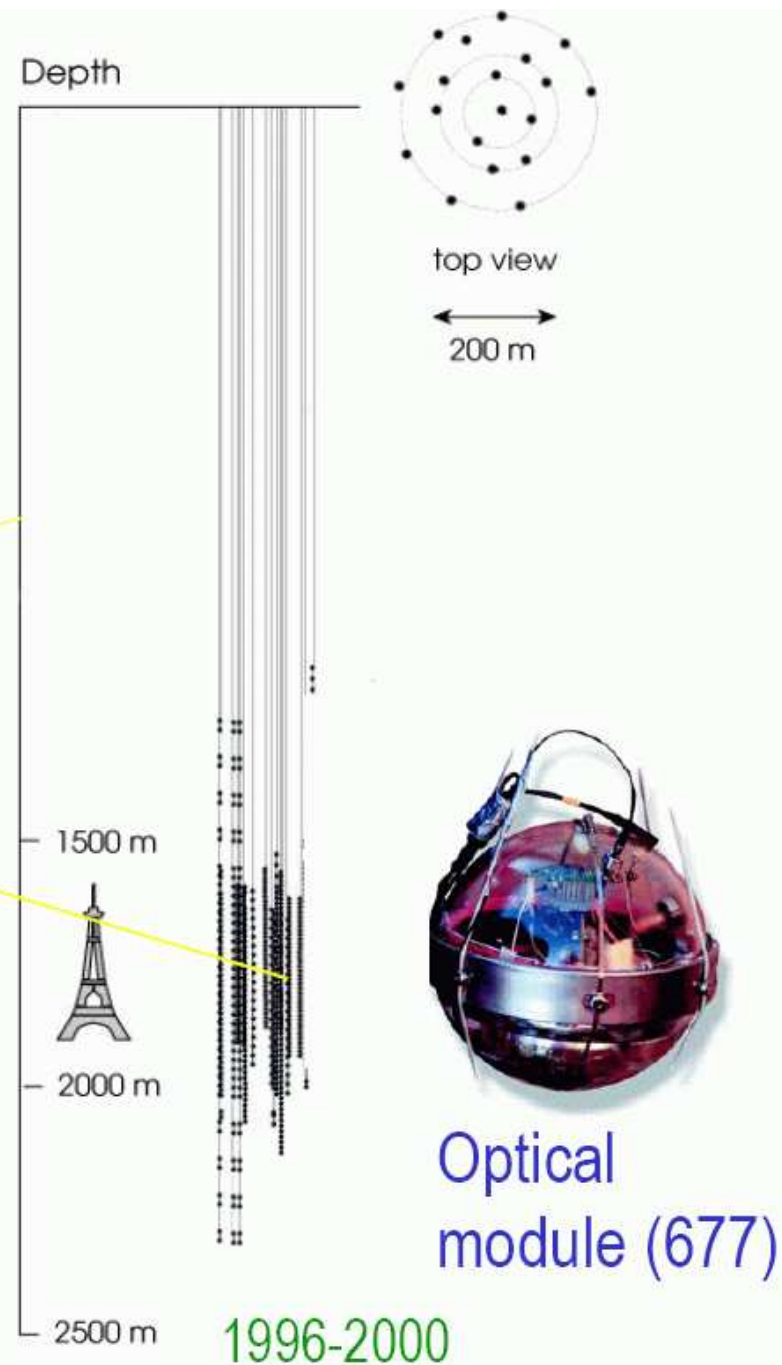
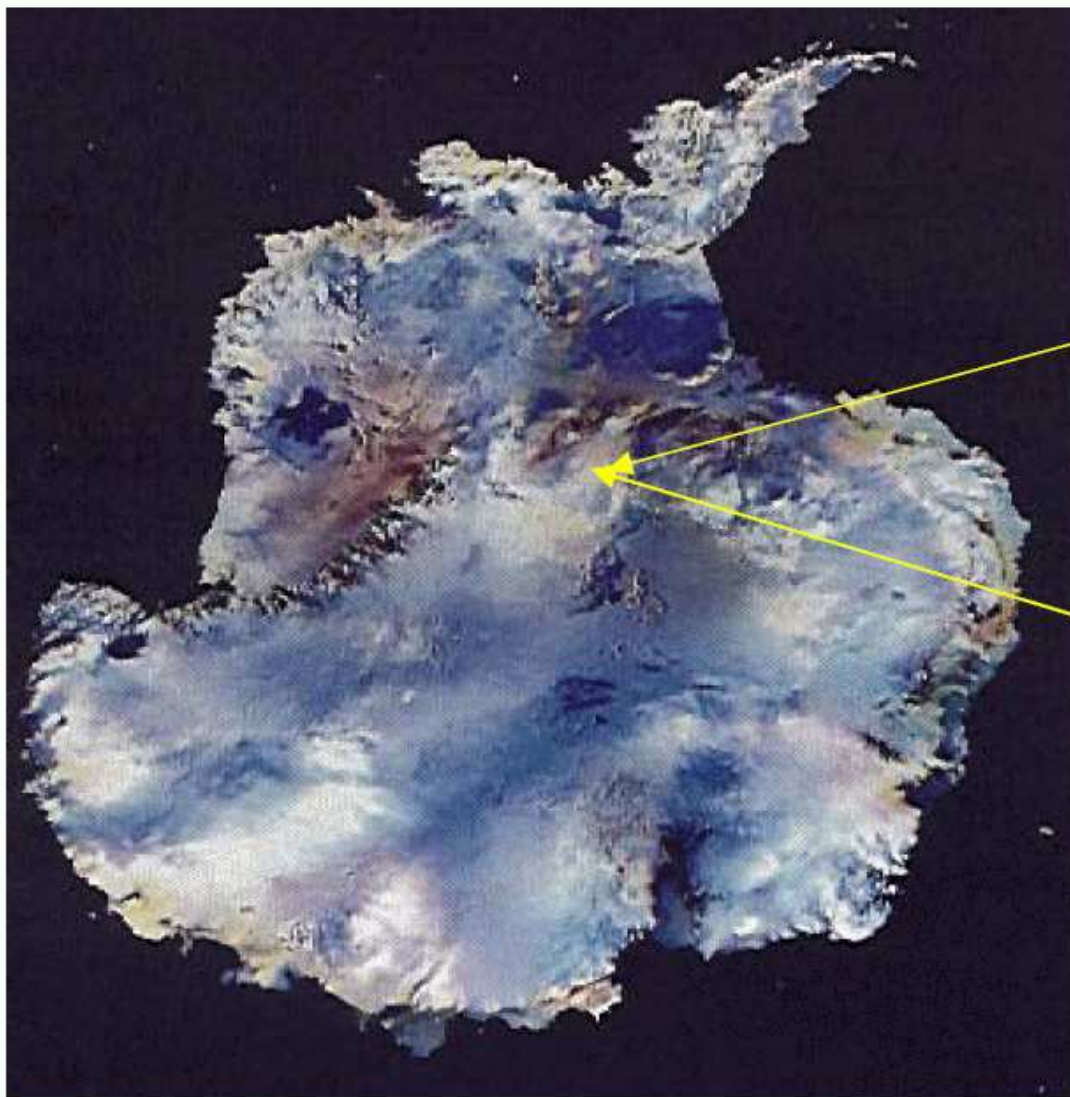
promieniowanie Czerenkowa mierzone przez skierowane do dołu fotopowielacze

Obszar aktywny: ok. **40 mln. ton lodu** (!)

Rejestracja **mionów** o energiach ≥ 50 GeV.



Eksperyment AMANDA w Amundsen-Scott Station South Pole



Ice Cube

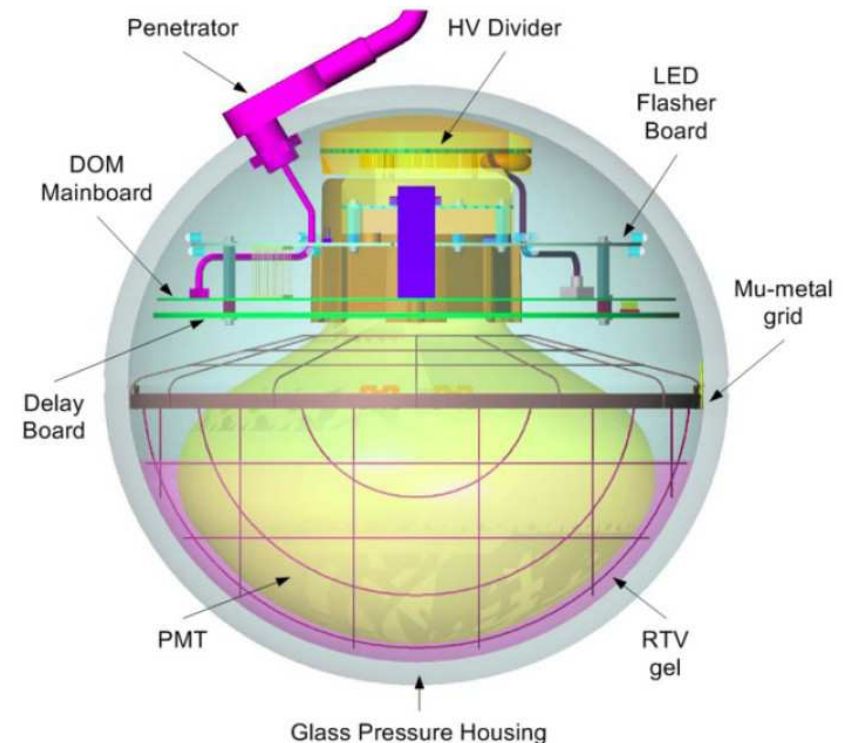
Detektor

Pojedynczy moduł optyczny (DOM) zawiera jeden fotopowielacz 10" oraz całą elektronikę (analogową, cyfrową, zasilanie HV, kalibracja LED).

Dwa kanały dygityzacji: 300 MHz (pomiar czasu) i 40 MHz (pomiar energii)

Zegar synchronizowany z dokładnością do 2ns ($<$ dokładność pomiaru)

Zużycie energii: 3.75 W.



Ice Cube

Detektor

Łącznie zainstalowano 86 lin z 5160 DOM, na głębokości 1450-2450 m, odstęp między linami 125 m, między DOM - 17 m

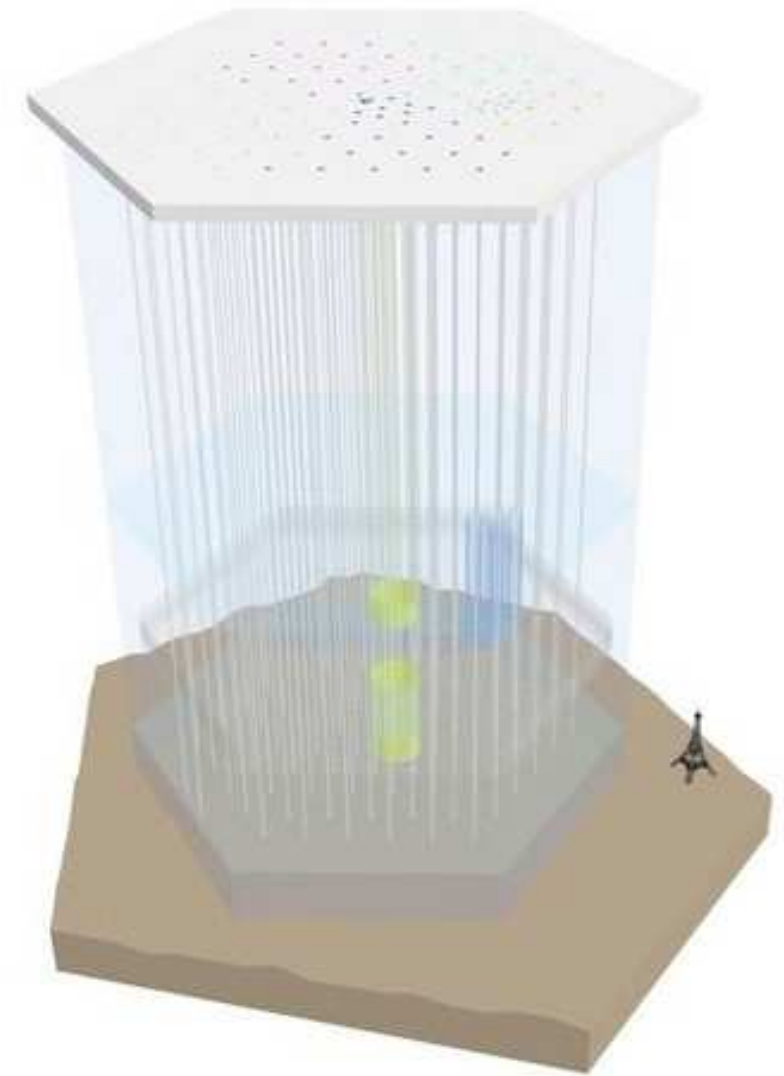
⇒ pomiar neutrin od 50 GeV
dokładność kierunku ok. 1°

DeepCore

6 lin z mniejszymi odstępami, aby móc mierzyć od ok. 10 GeV

IceTop

80 stacji powierzchniowych



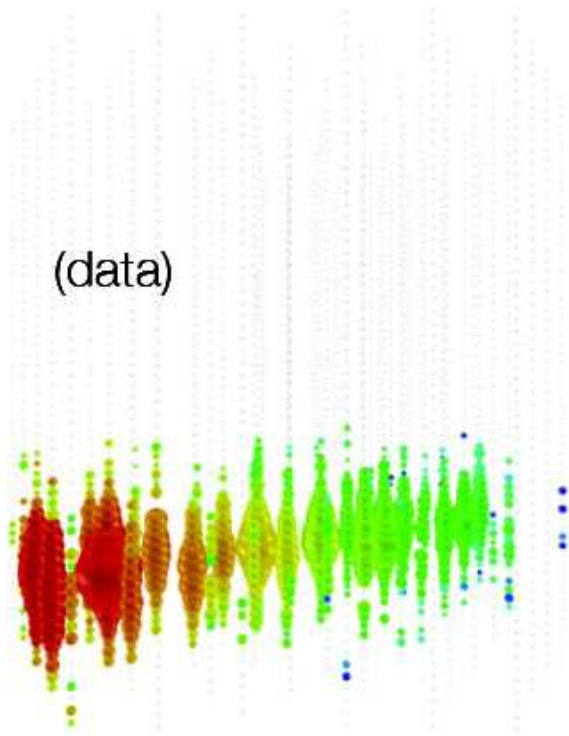
Ice Cube

Przypadki

Przypadki oddziaływań neutrin rekonstruowane w detektorze

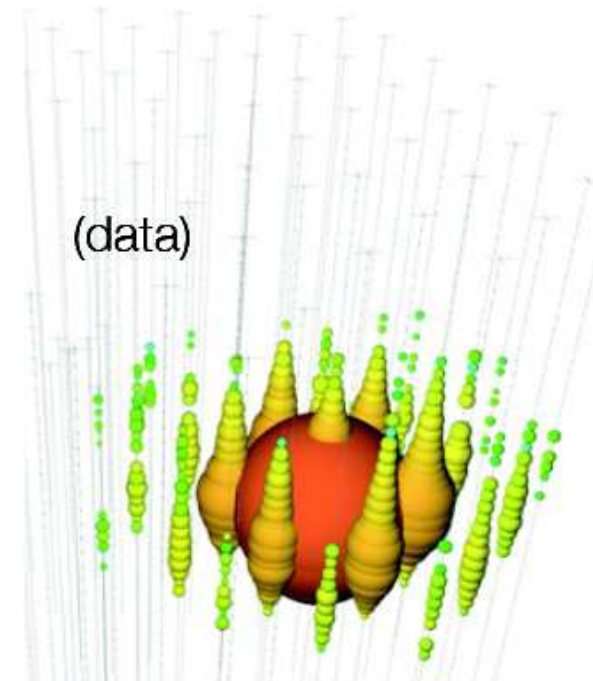
Tor

⇒ ν_μ (CC)



Kaskada

⇒ ν_e (CC) lub ν_τ (CC) lub NC



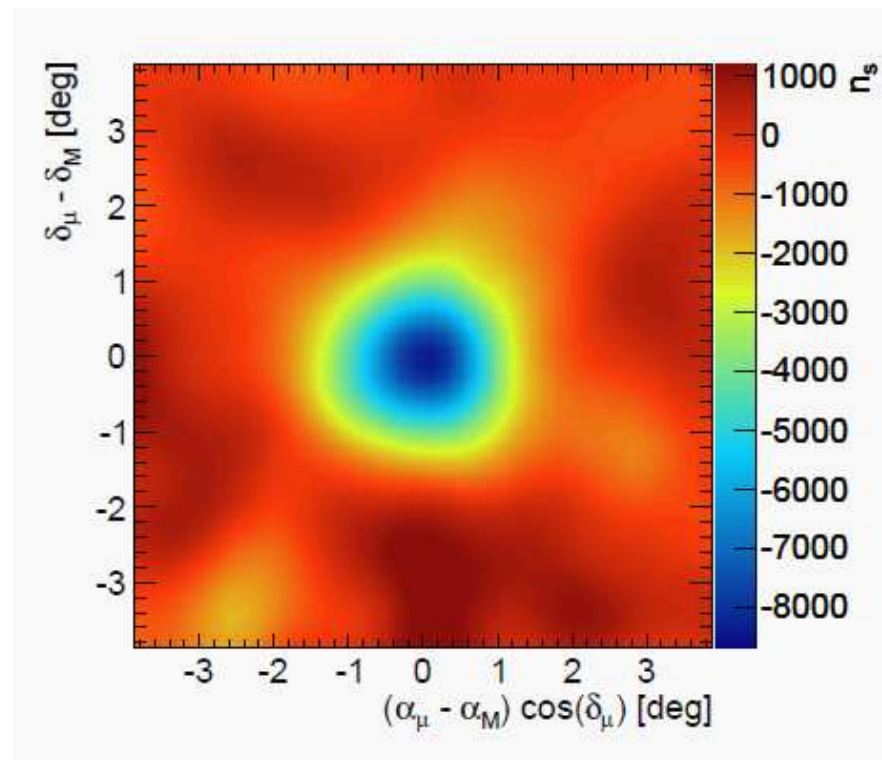
Rozmiar: energia, kolor: czas

Ice Cube

Kalibracja

Dokładne wyznaczenie kierunku mionu wymaga bardzo precyzyjnej synchronizacji poszczególnych detektorów. \Rightarrow dokładność dla mionów 100 TeV ok. 0.5°

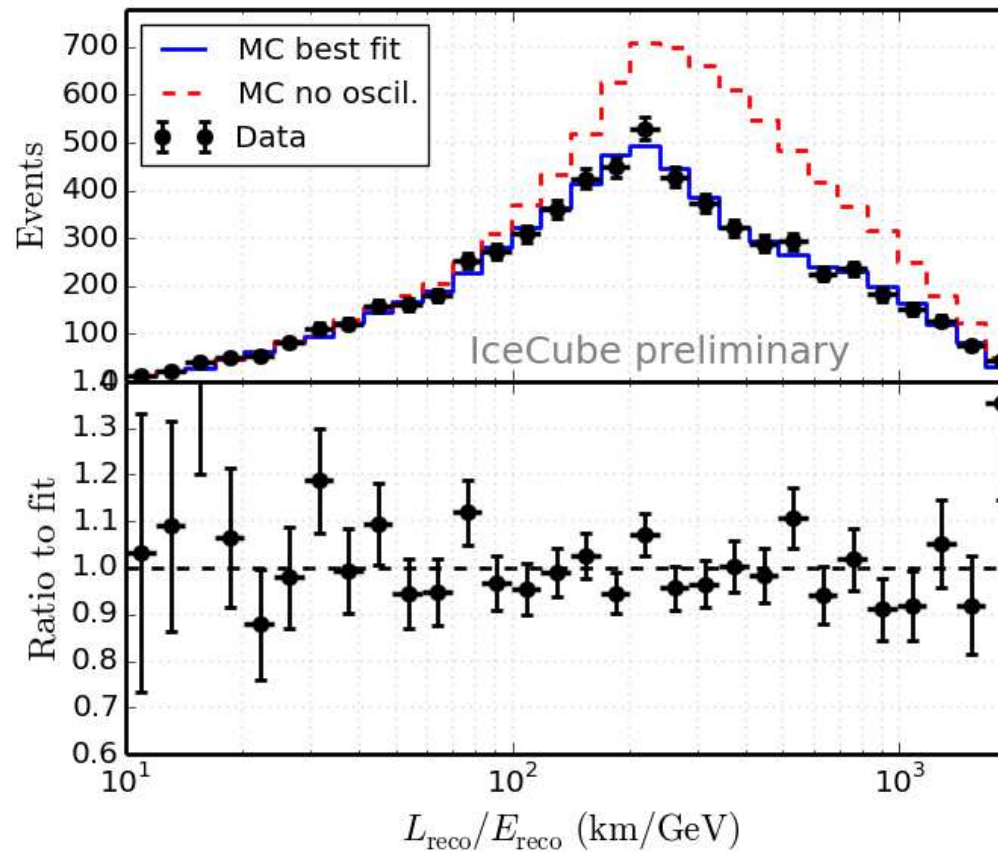
“Cień Księżyca” w mionach kosmicznych



Ice Cube

Wyniki

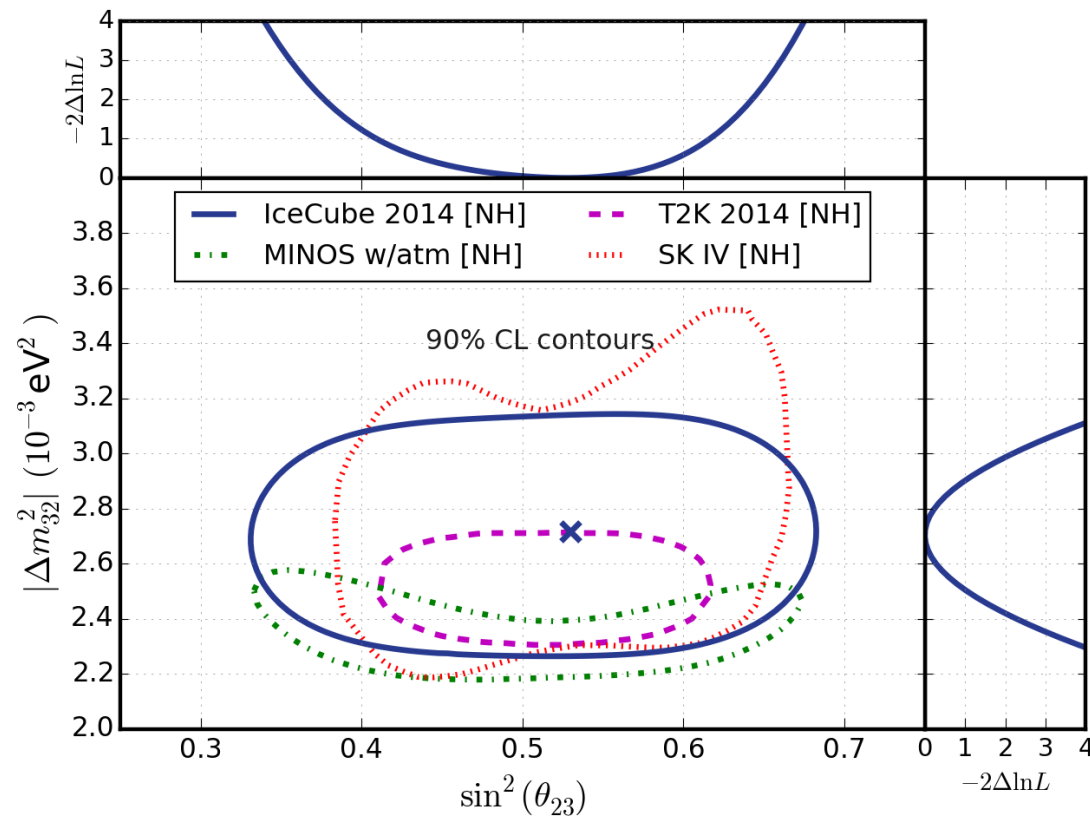
Badanie neutrin “niskiej energii” (10-300 GeV) - dominują neutrina atmosferyczne.



Ice Cube

Wyniki

Badanie neutrin “niskiej energii” (10-300 GeV) - dominują neutrina atmosferyczne.

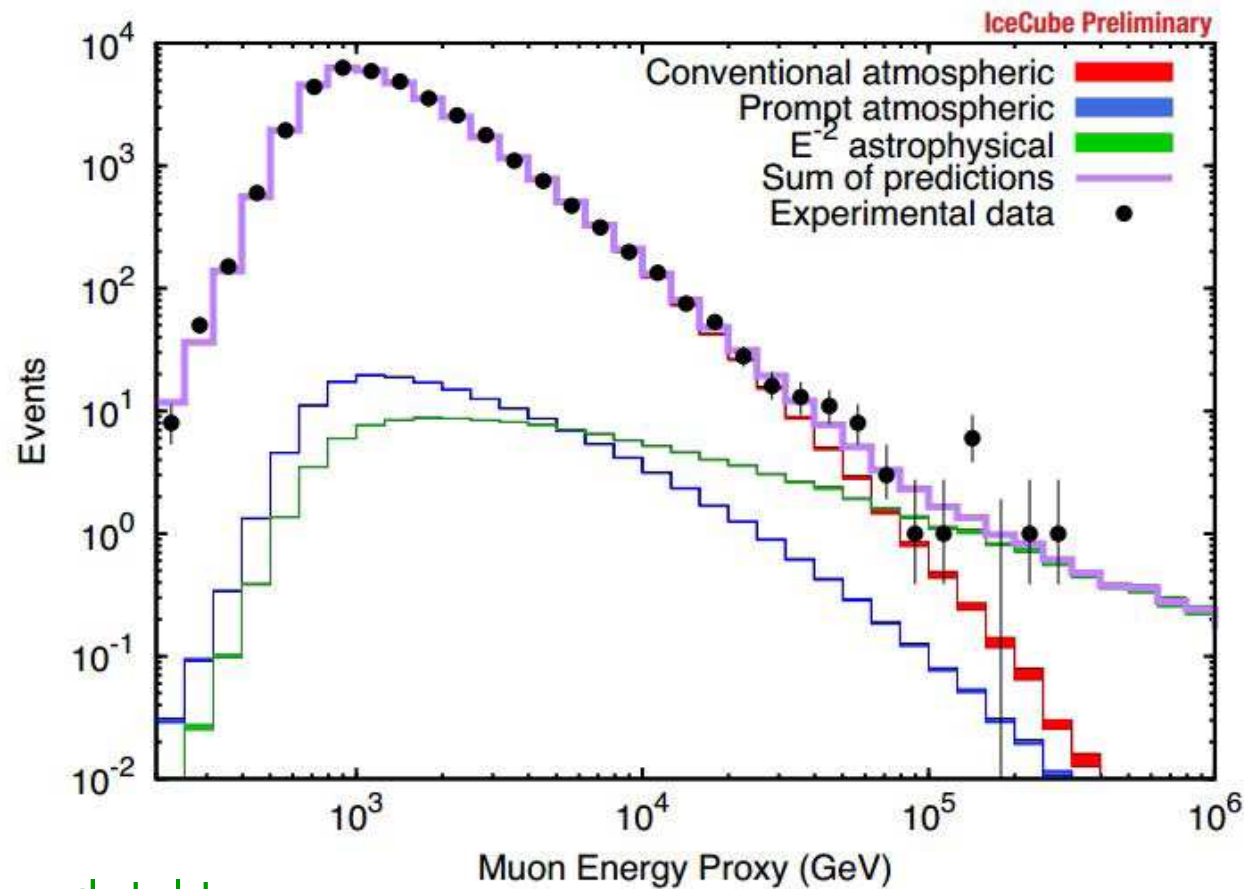


Czułość na parametry oscylacji podobna do eksperymentów przy niższych energiach!

Ice Cube

Wyniki

Rekonstruowane energie mionów lecących od dołu - muszą pochodzić z neutrin!
Widać wyraźną nadwyżkę w stosunku do oczekiwanych neutronów atmosferycznych.



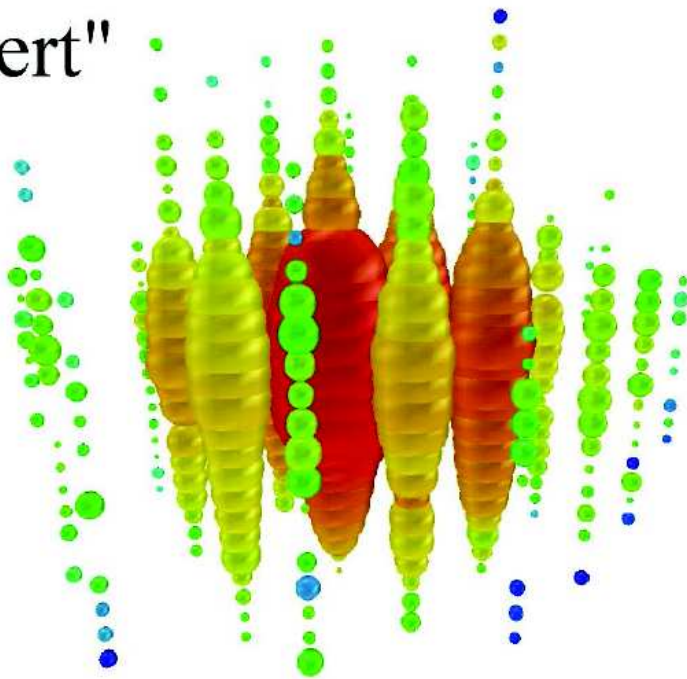
Wyniki z 2 lat pracy detektora

Ice Cube

Wyniki

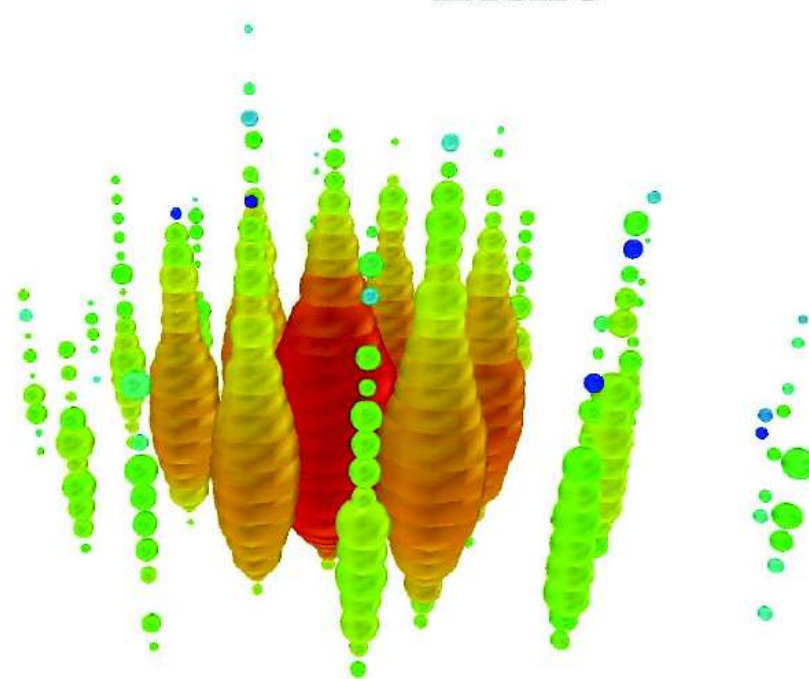
Pierwsze przypadki neutrin o energii powyżej 1 PeV (!)

"Bert"



August 9, 2011: 1.04 PeV

"Ernie"



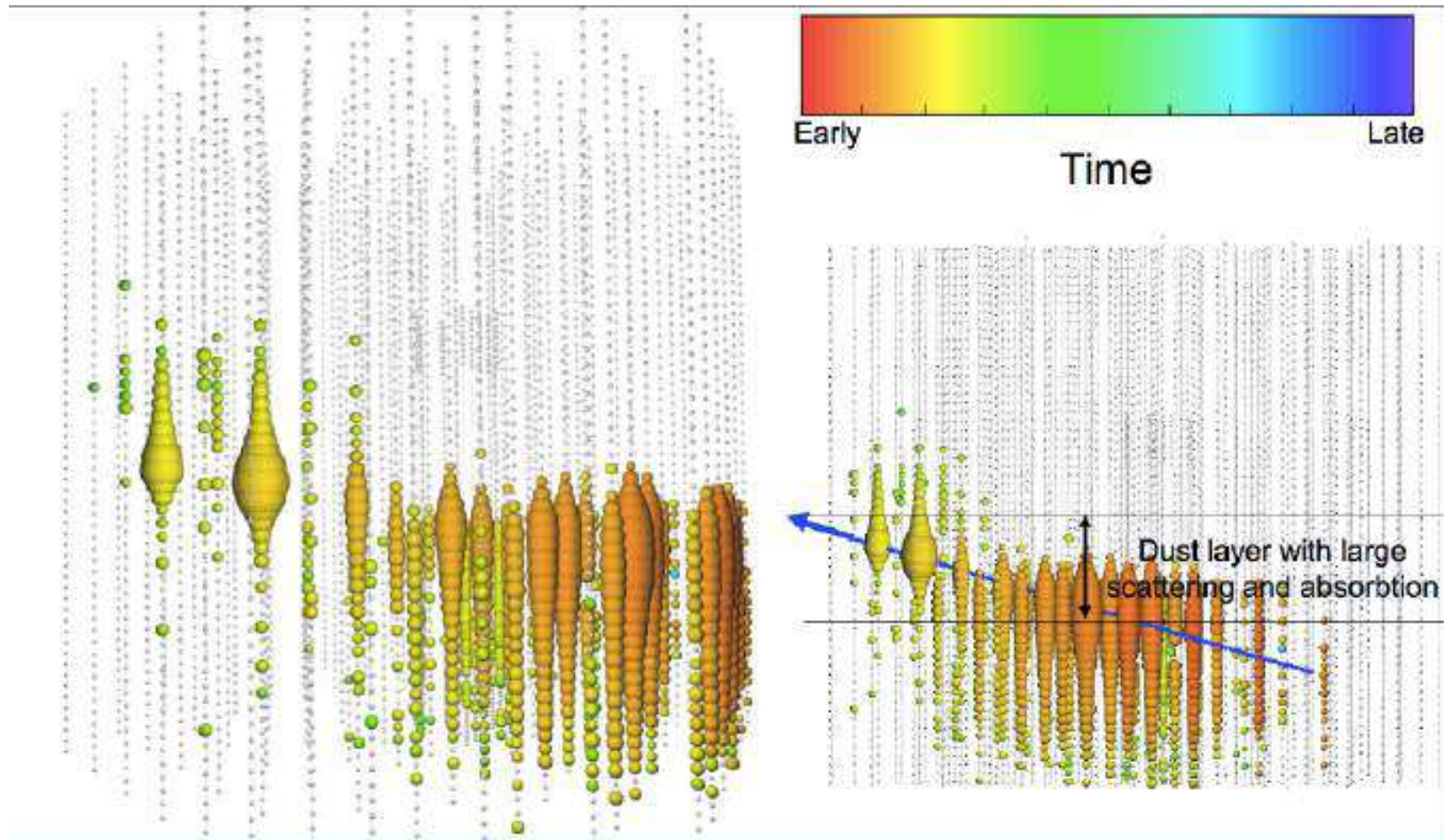
January 3, 2012: 1.14 PeV

Przypadki typu "kaskada"

Ice Cube

Wyniki

Przypadek o najwyższej **zdeponowanej** energii: 2.6 ± 0.3 PeV (11 czerwca 2014)



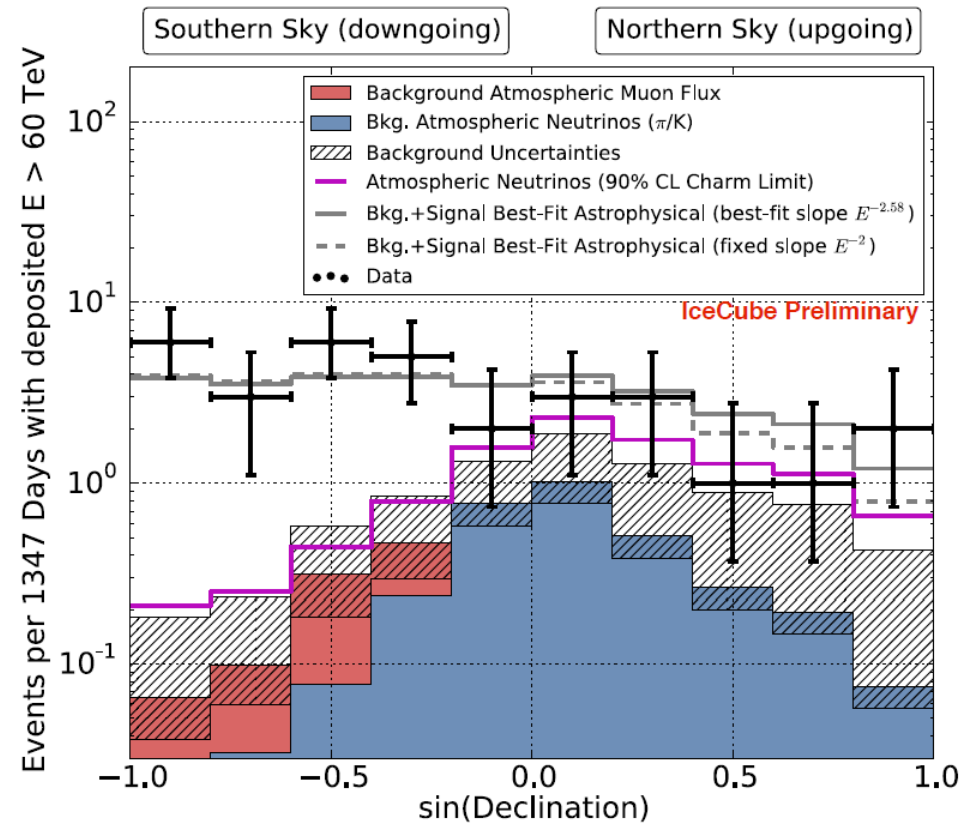
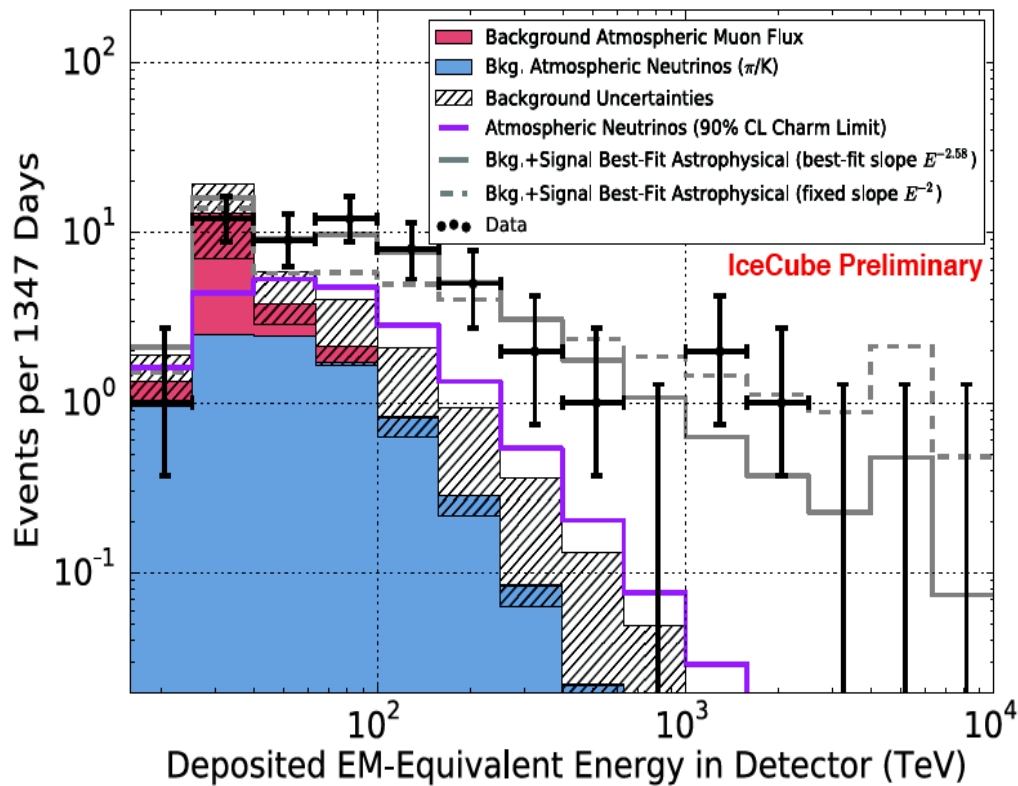
Przypadek typu “tor” \Rightarrow energia neutrino była prawdopodobnie dużo wyższa...

Ice Cube

Wyniki

Rekonstruowana energia dla kaskad zaczynających się w detektorze.

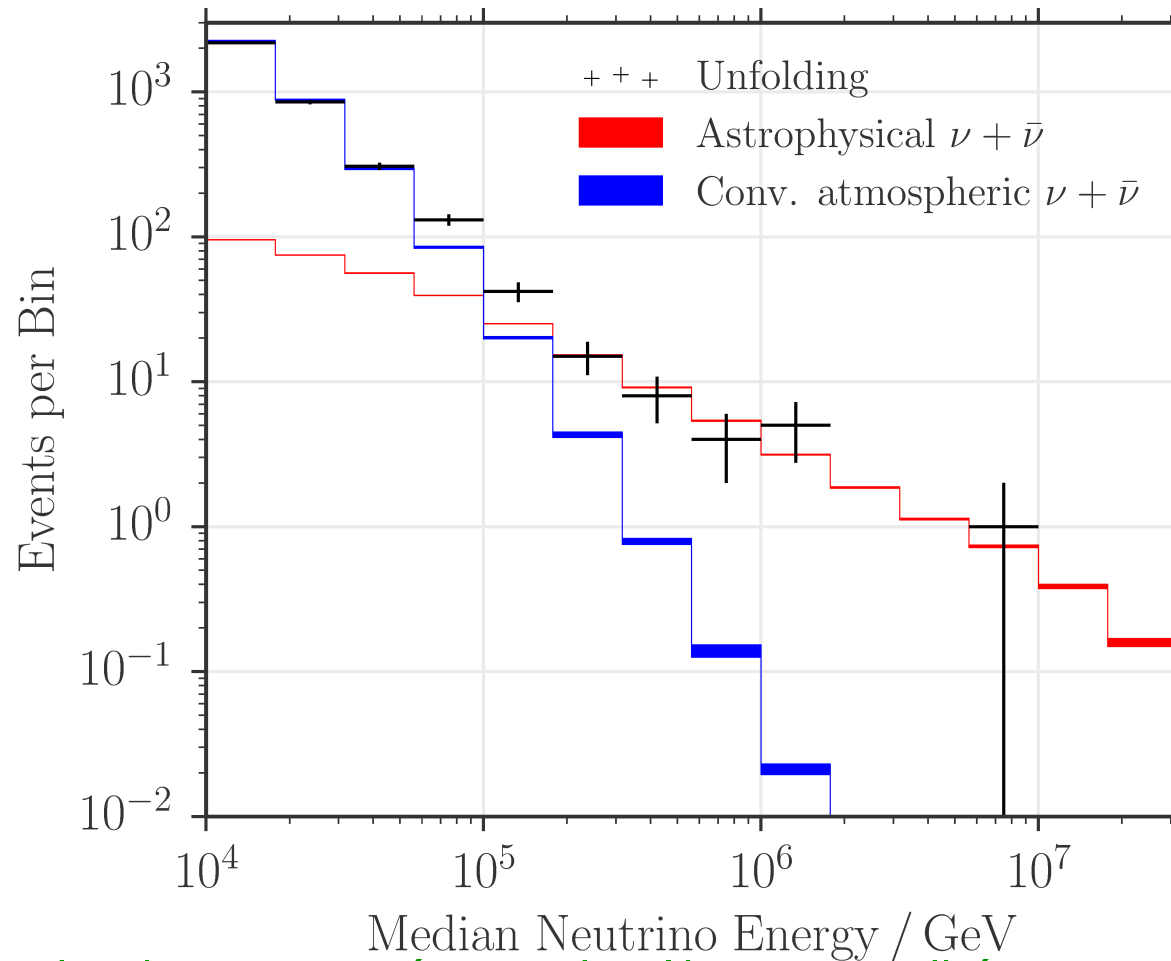
Wyraźnie widoczna nadwyżka, konsystentna z rozkładem płaskim



Ice Cube

Wyniki

Rekonstruowane (najbardziej prawdopodobne) energie mionów lecących od dołu.



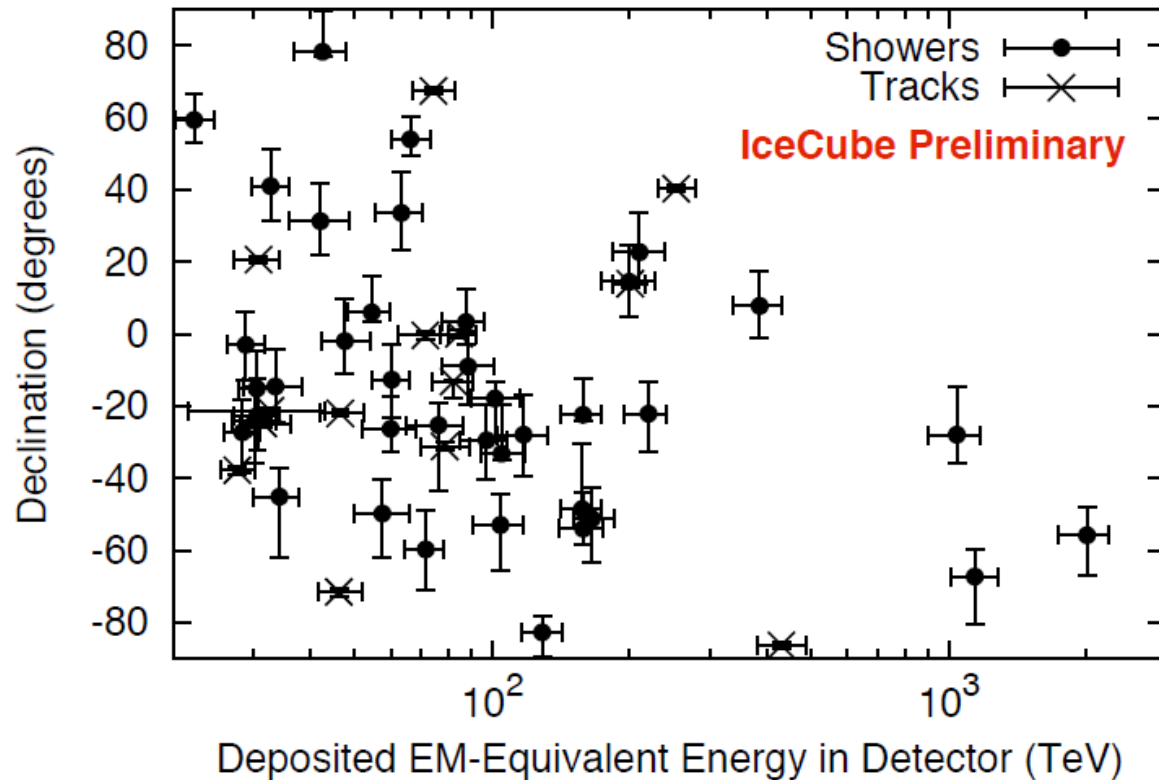
Wyniki z 6 lat pracy detektora: wyraźna nadwyżka przypadków ponad tło atmosferyczne

Ice Cube

Wyniki

2010-2015

54 przypadki, przy oczekiwanym tle $9.0_{-2.2}^{+8.0}$ (neutrino atm.) + 12.6 ± 5.1 (miony)



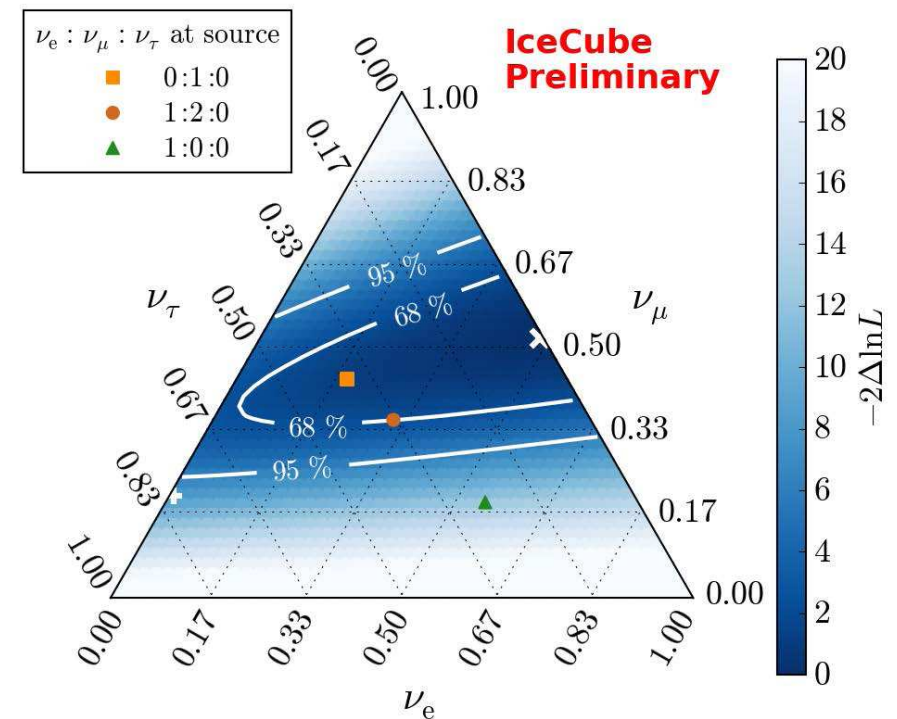
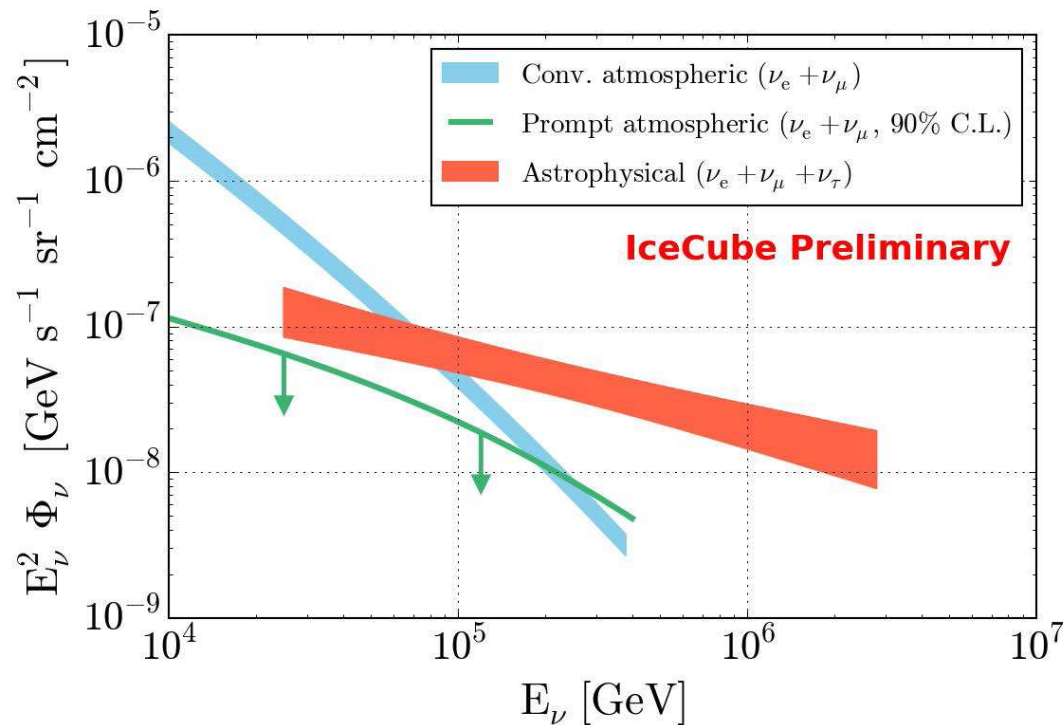
Potwierdzona na poziomie $> 5\sigma$ obecność składowej kosmologicznej...

Ice Cube

Wyniki

Dopasowane widmo neutrin kosmicznych: $\gamma = 2.13 \pm 0.13$

Dopasowany skład na powierzchni Ziemi: $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 0$
(zgodny w granicach błędów z oczekiwanym 1 : 1 : 1)

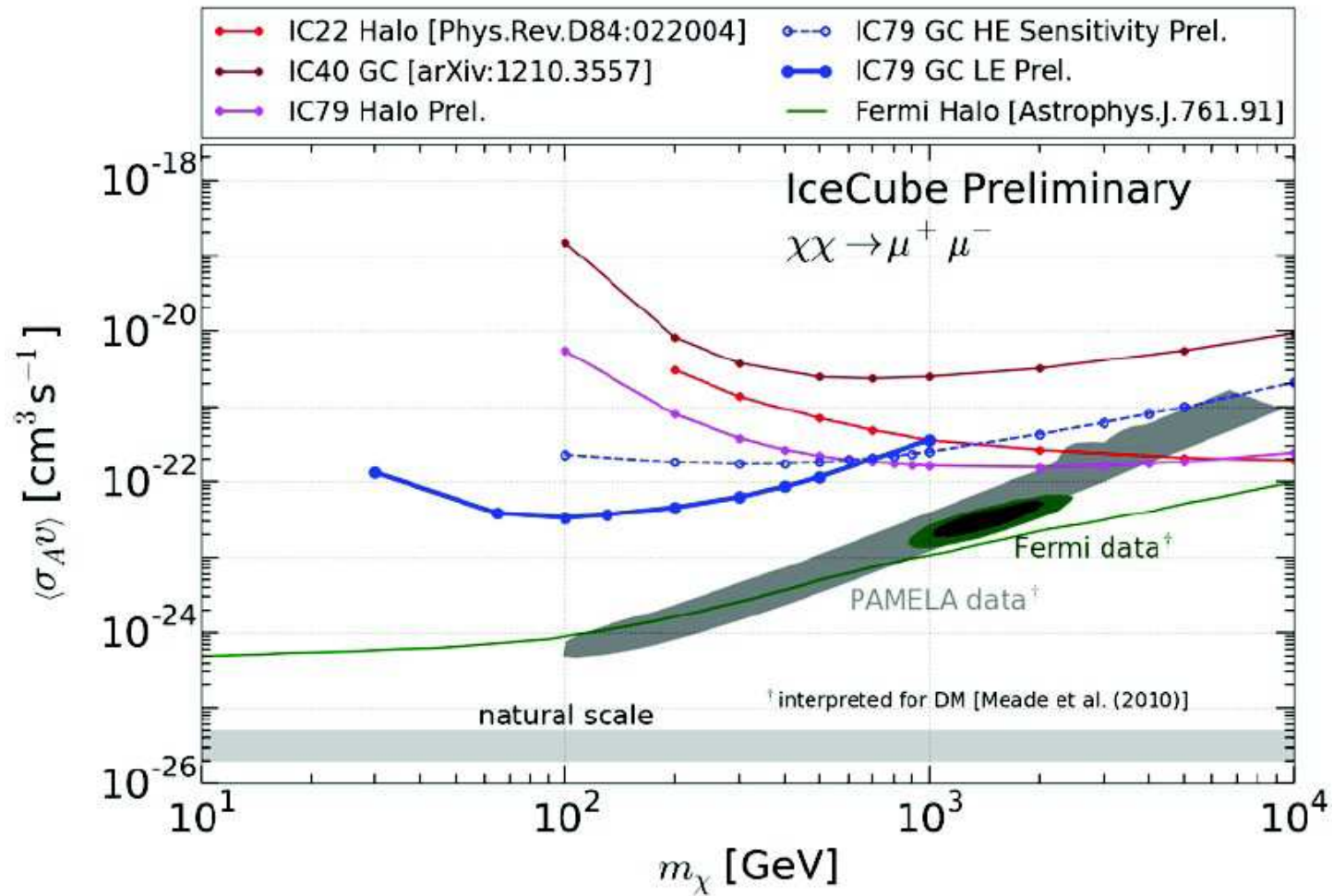


Oczekiwane nachylenie widma neutrin atmosferycznych: $\gamma = 2.7 - 3.1$

Ice Cube

Wyniki

Poszukiwanie neutrin z anihilacji DM w Galaktyce

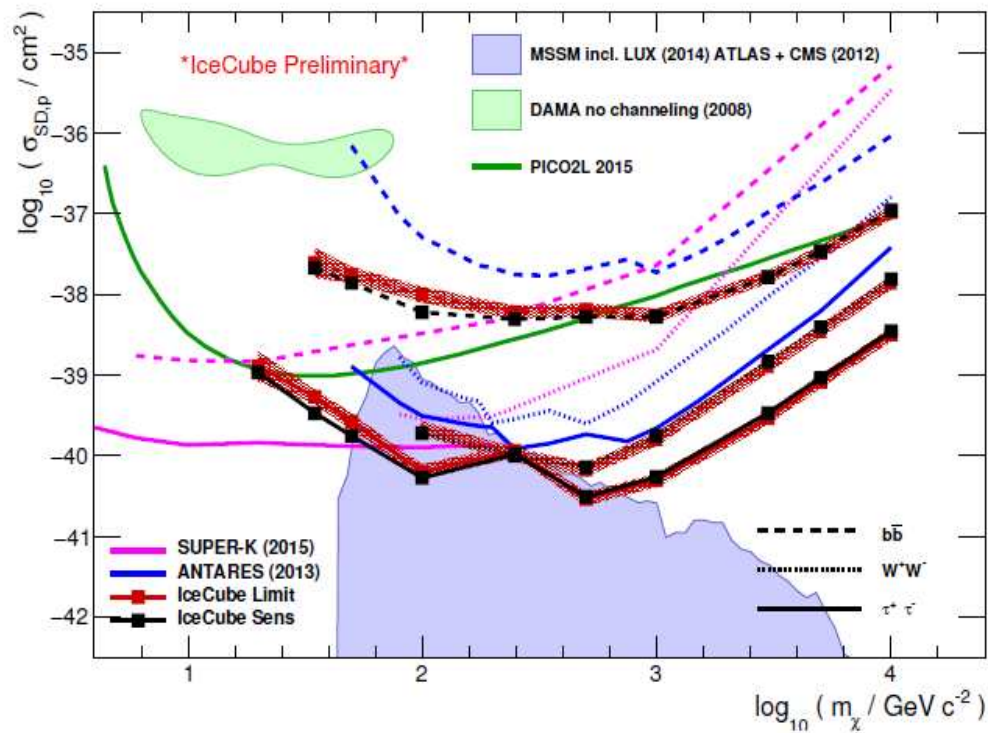


Ice Cube

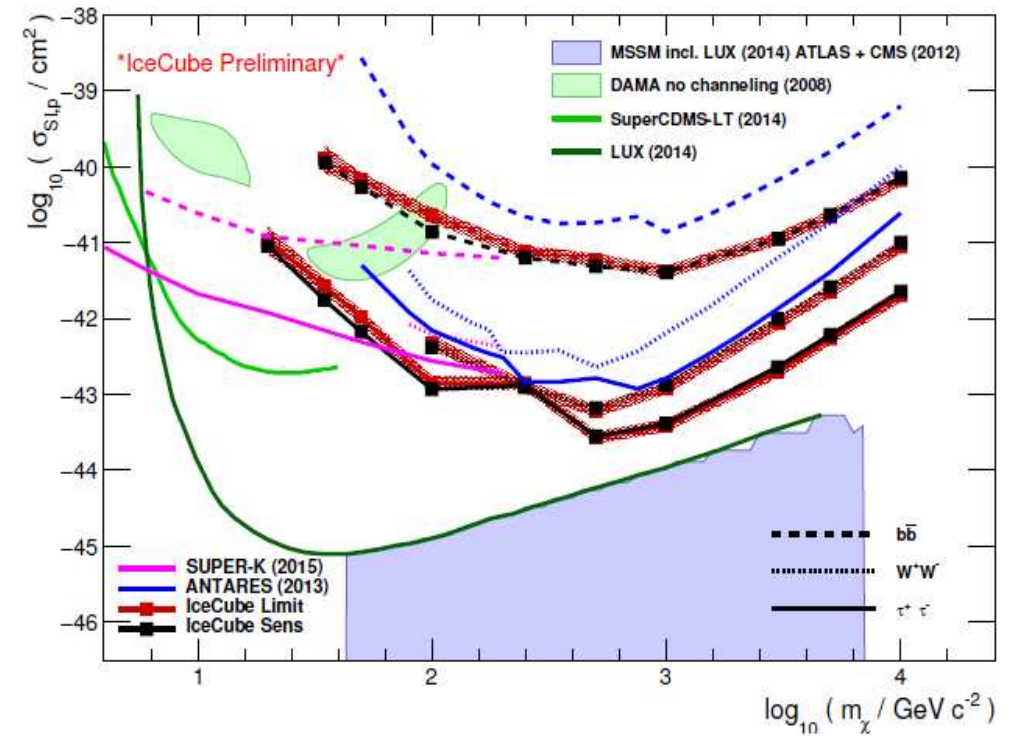
Wyniki

Poszukiwanie neutrin z anihilacji DM w Słońcu

Spin dependent



Spin independent

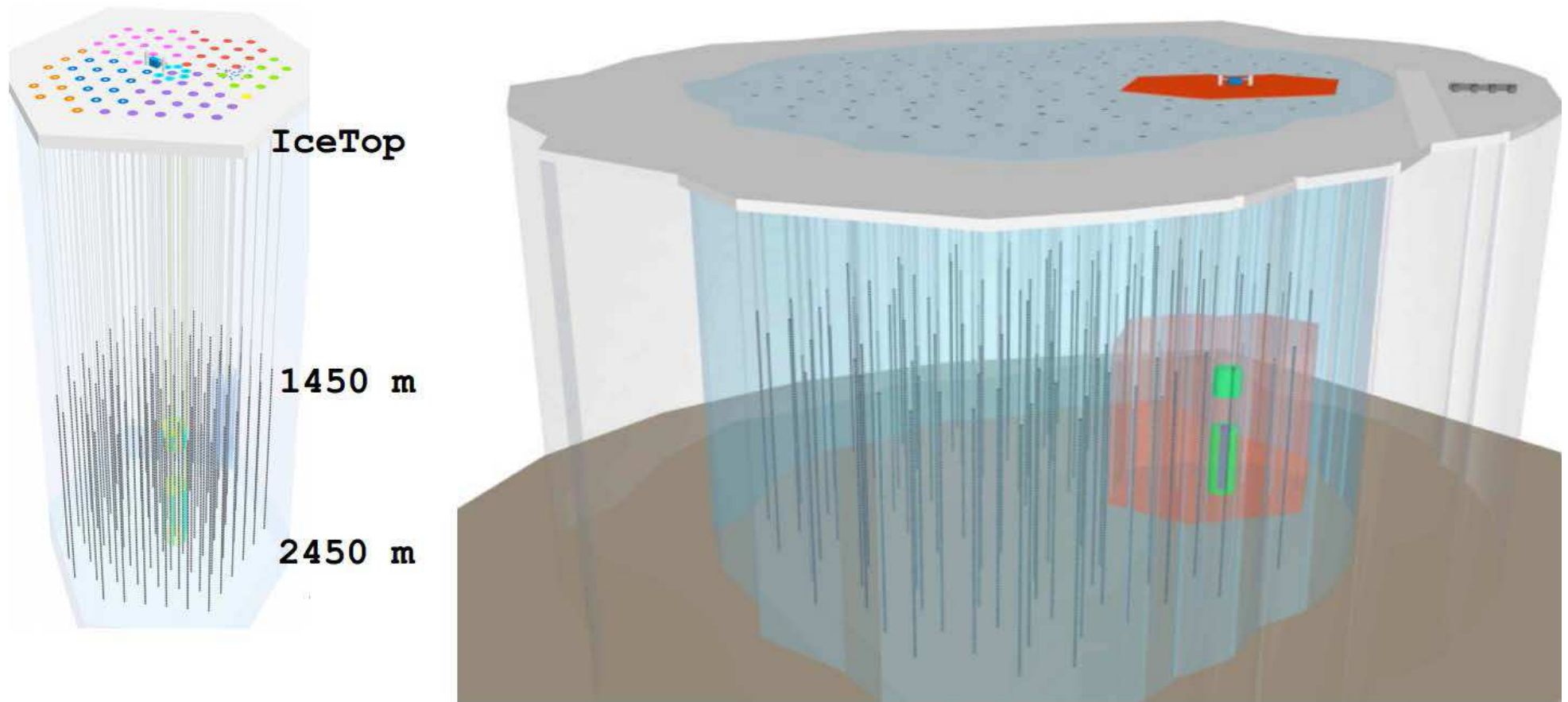


Ice Cube

Plany na przyszłość

Znaczne powiększenie detektora z większymi odstępami (większa objętość)

Uzupełnienie gęstszą siecią detektorów w środku - PINGU (niskie energie)



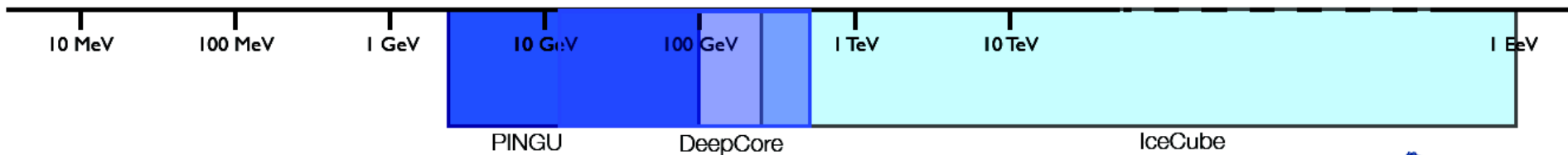
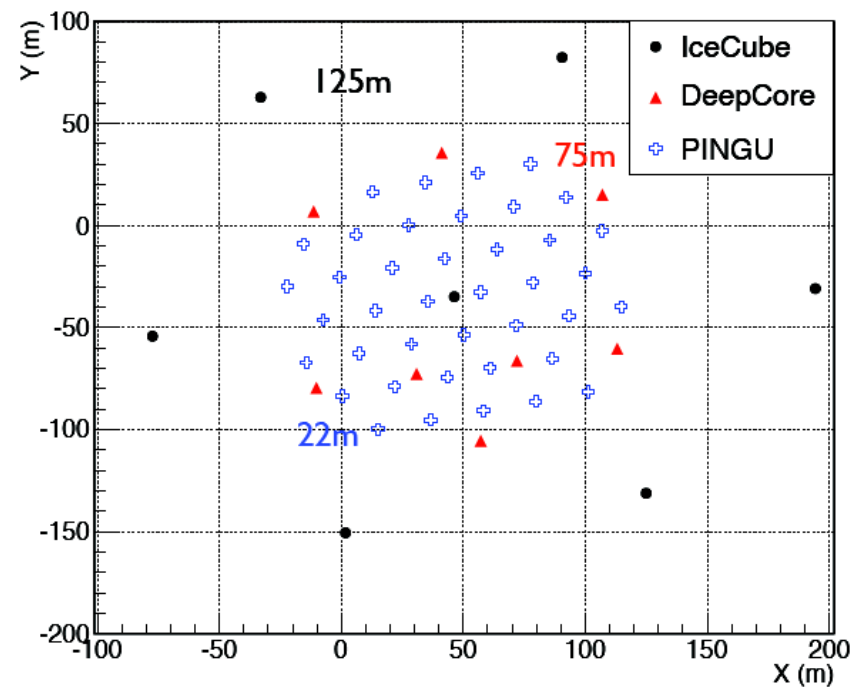
Ice Cube

Plany na przyszłość

Znaczne powiększenie detektora z większymi odstępami (większa objętość)

Uzupełnienie gęstszą siecią detektorów w środku - **PINGU** (niskie energie)

- 78 Strings
- 125m string spacing
- 17m DOM spacing
- Add 8 strings
- 75m string spacing
- 7m DOM spacing
- Add 40 strings
- 22m string spacing
- 3m DOM spacing

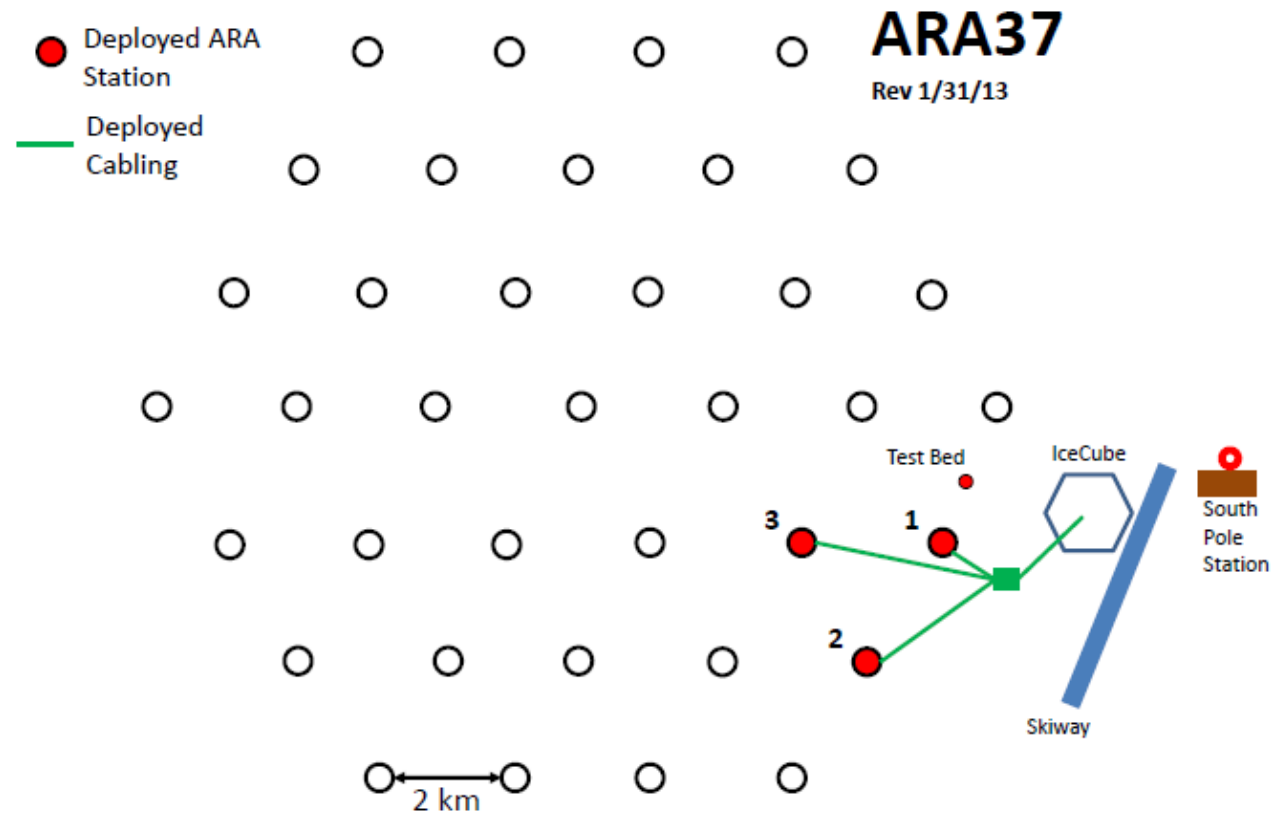


Ice Cube

Plany na przyszłość

Znaczne zwiększenie “aktywnej objętości” detektora możliwe dla detekcji radiowej.

ARA - Askaryan Radio Array

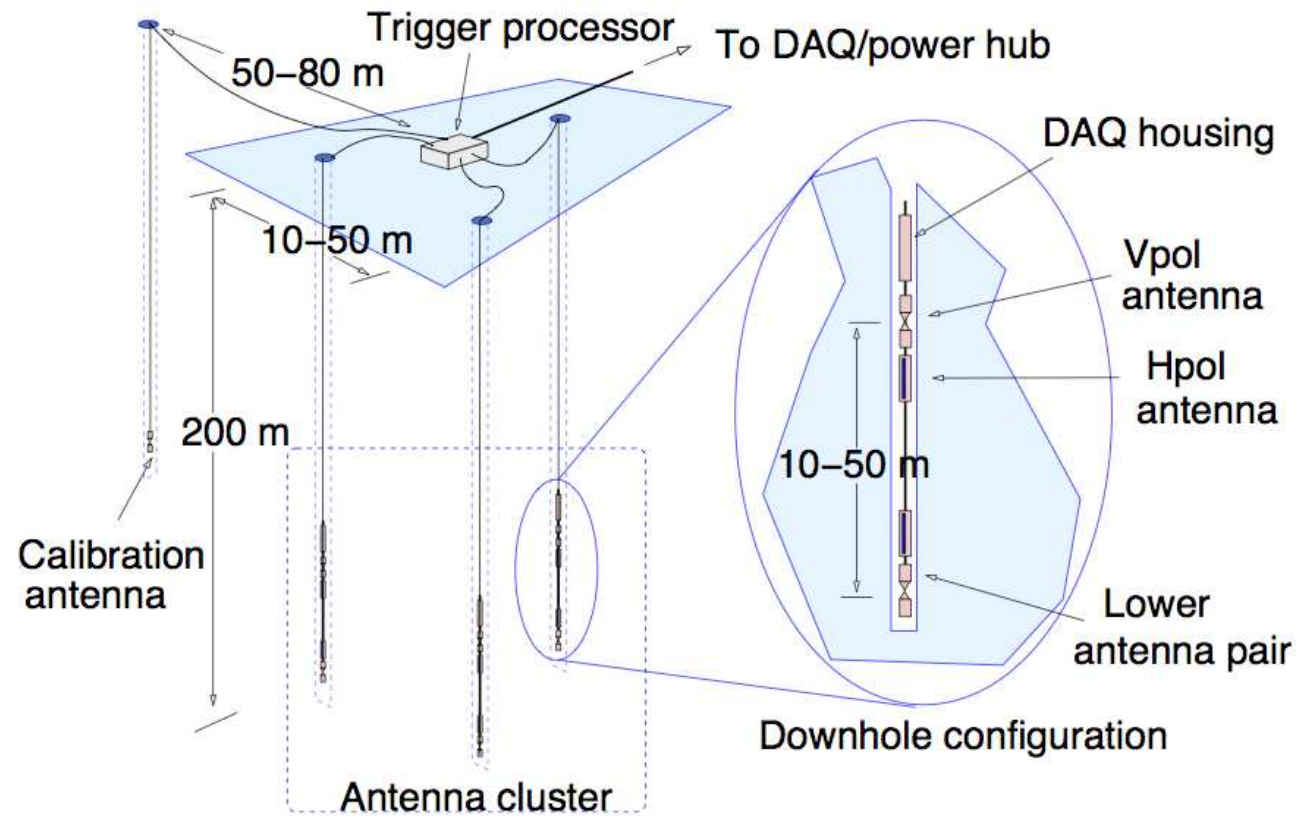


Ice Cube

Plany na przyszłość

Znaczne zwiększenie “aktywnej objętości” detektora możliwe dla detekcji radiowej.

ARA - Askaryan Radio Array

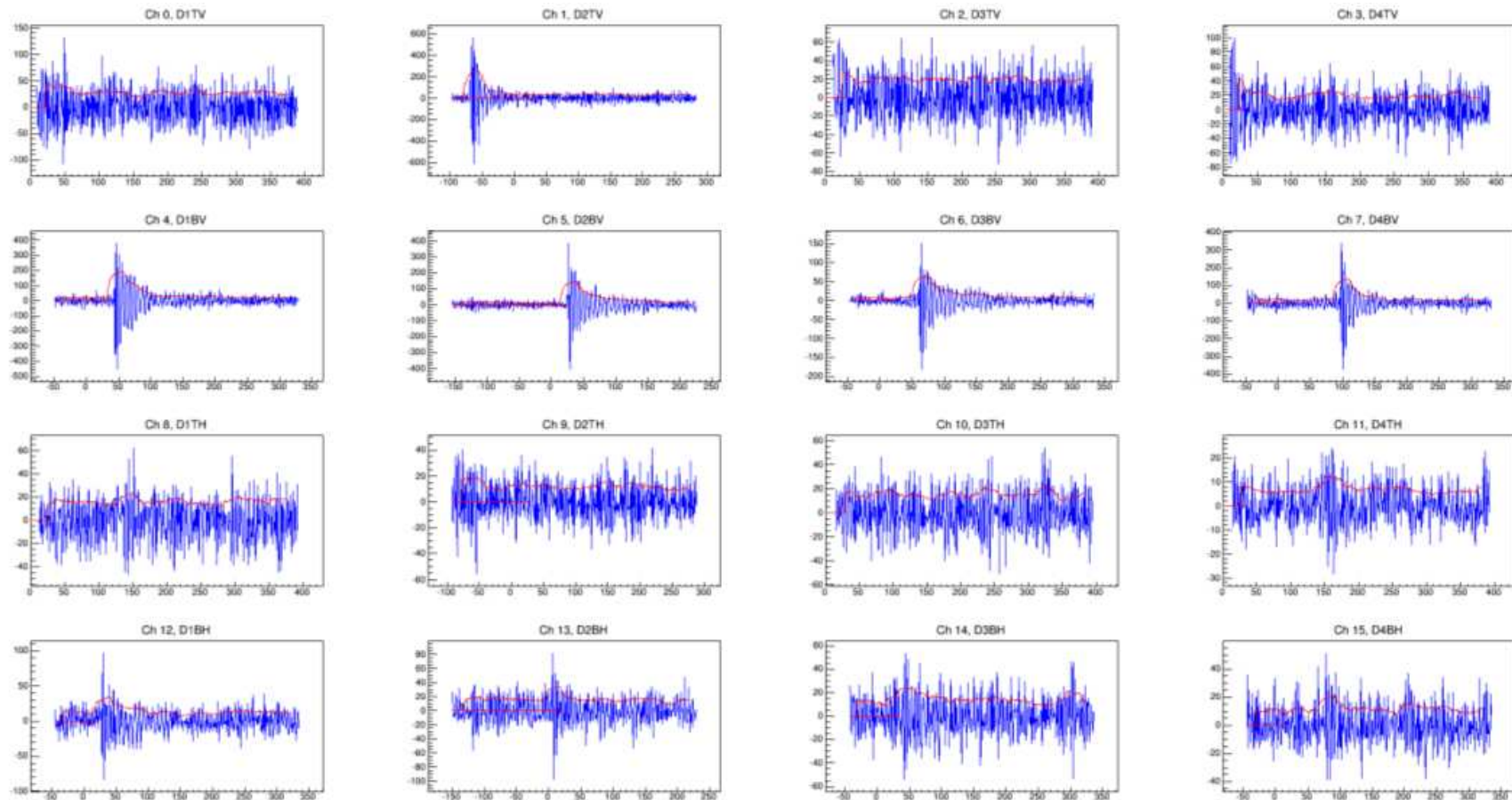


Ice Cube

Plany na przyszłość

ARA - Askaryan Radio Array

Pierwsze trzy detektory prototypowe dostarczają już danych, dwa kolejne w 2017-18

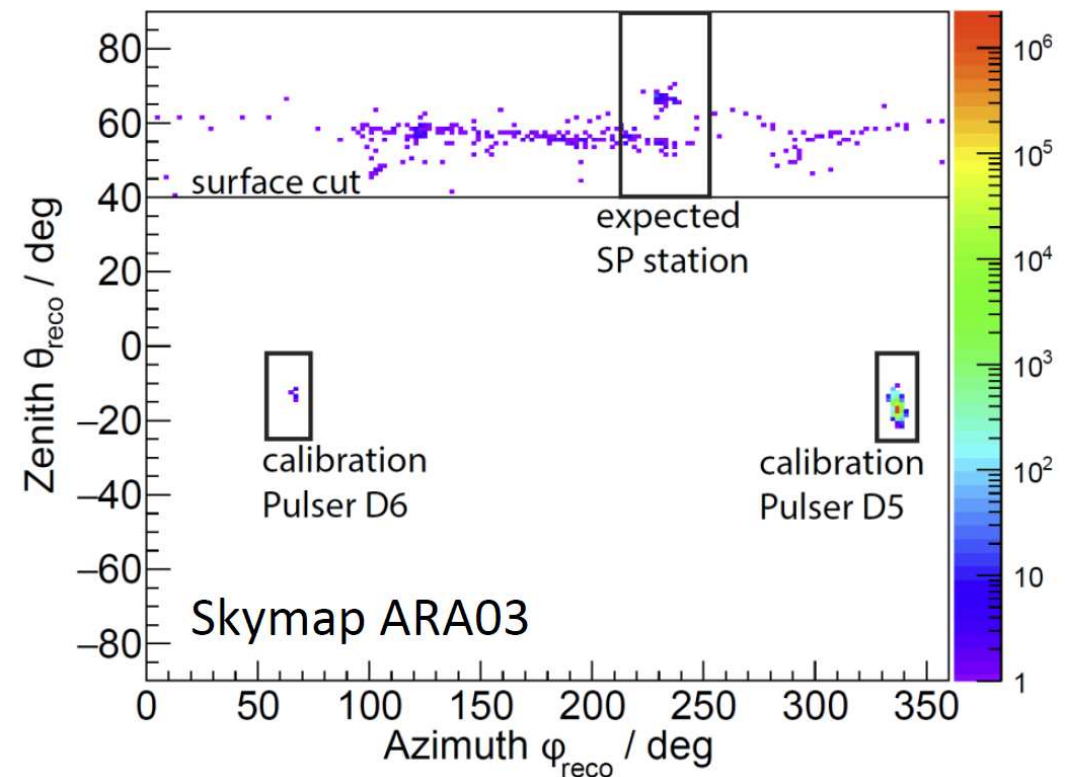
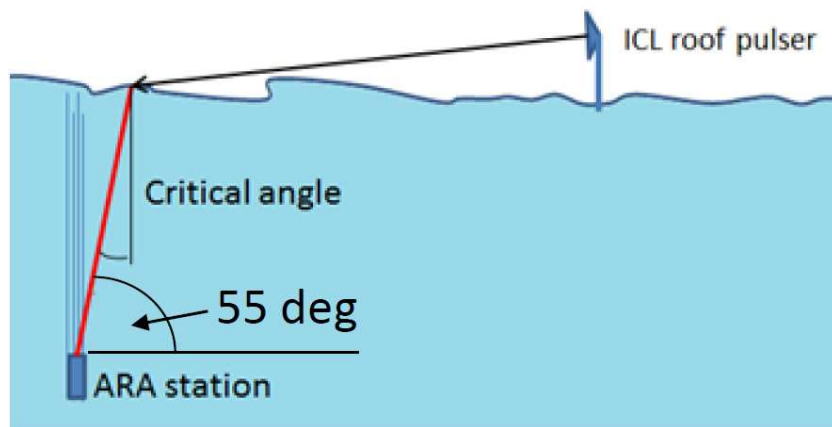


Ice Cube

Plany na przyszłość

ARA - Askaryan Radio Array

Pomiar czasów detekcji impulsu umożliwia rekonstrukcję kierunku \Rightarrow odrzucanie tła



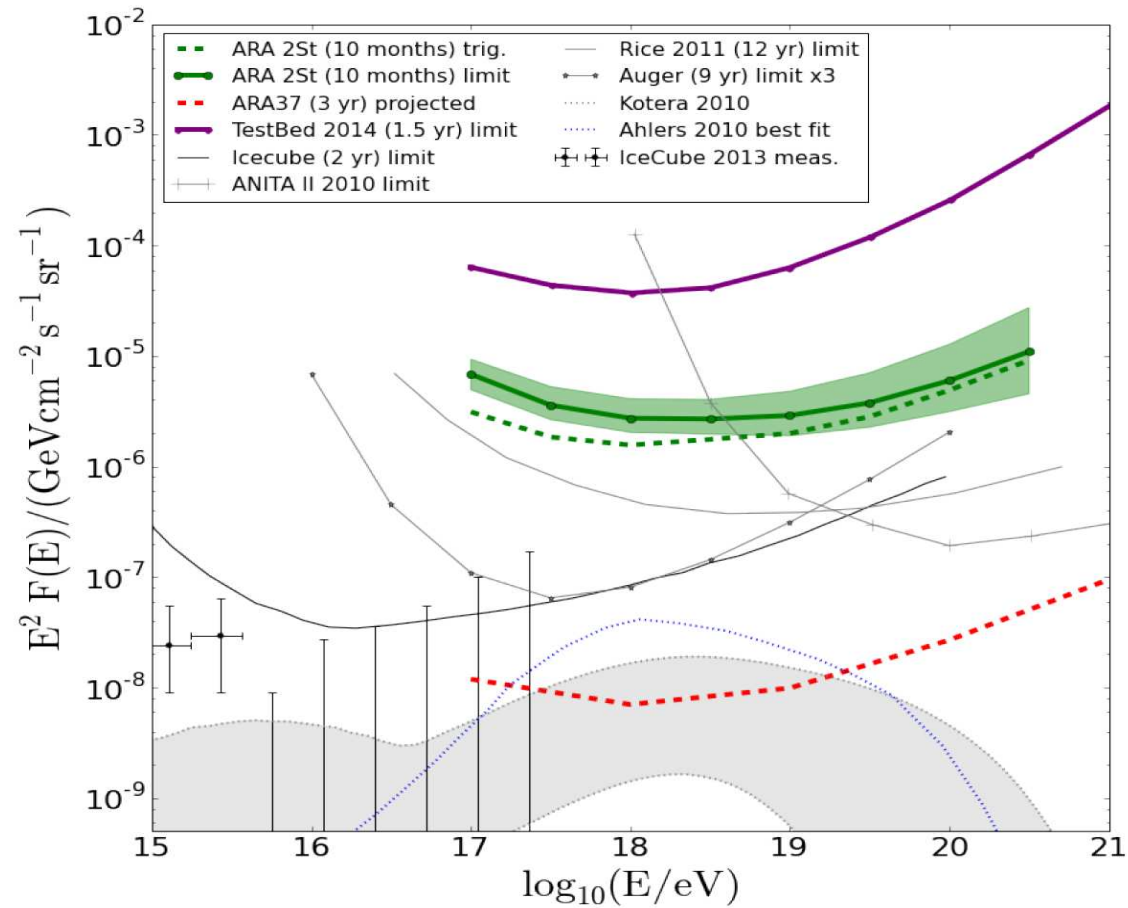
Dotychczas nie zaobserwowano przypadku, który pochodziłby z pod powierzchni lodu...

Ice Cube

Plany na przyszłość

ARA - Askaryan Radio Array

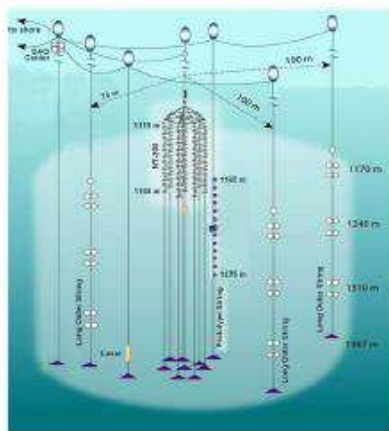
Pierwsze wyniki z analizy danych detektorów prototypowych



Inne eksperymenty

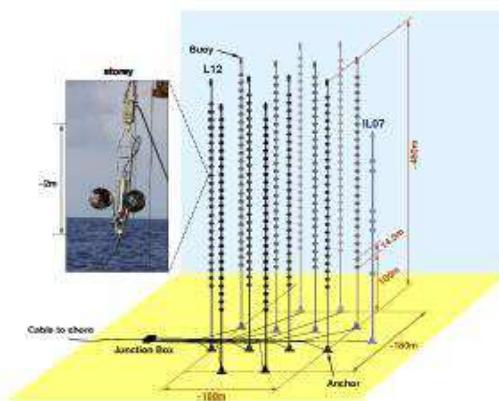
Alternatywą dla lodu jest woda - w przeszłości były już budowane detektory mierzące promieniowanie Czerenkowa w dużych zbiornikach wodnych

NT-200+



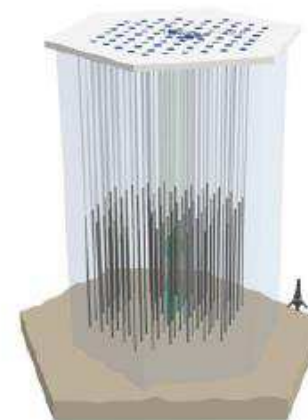
- Lake Baikal
- $1/2000 \text{ km}^3$
- 228 PMTs

ANTARES



- Mediterranean Sea
- $1/100 \text{ km}^3$
- 885 PMTs

IceCube



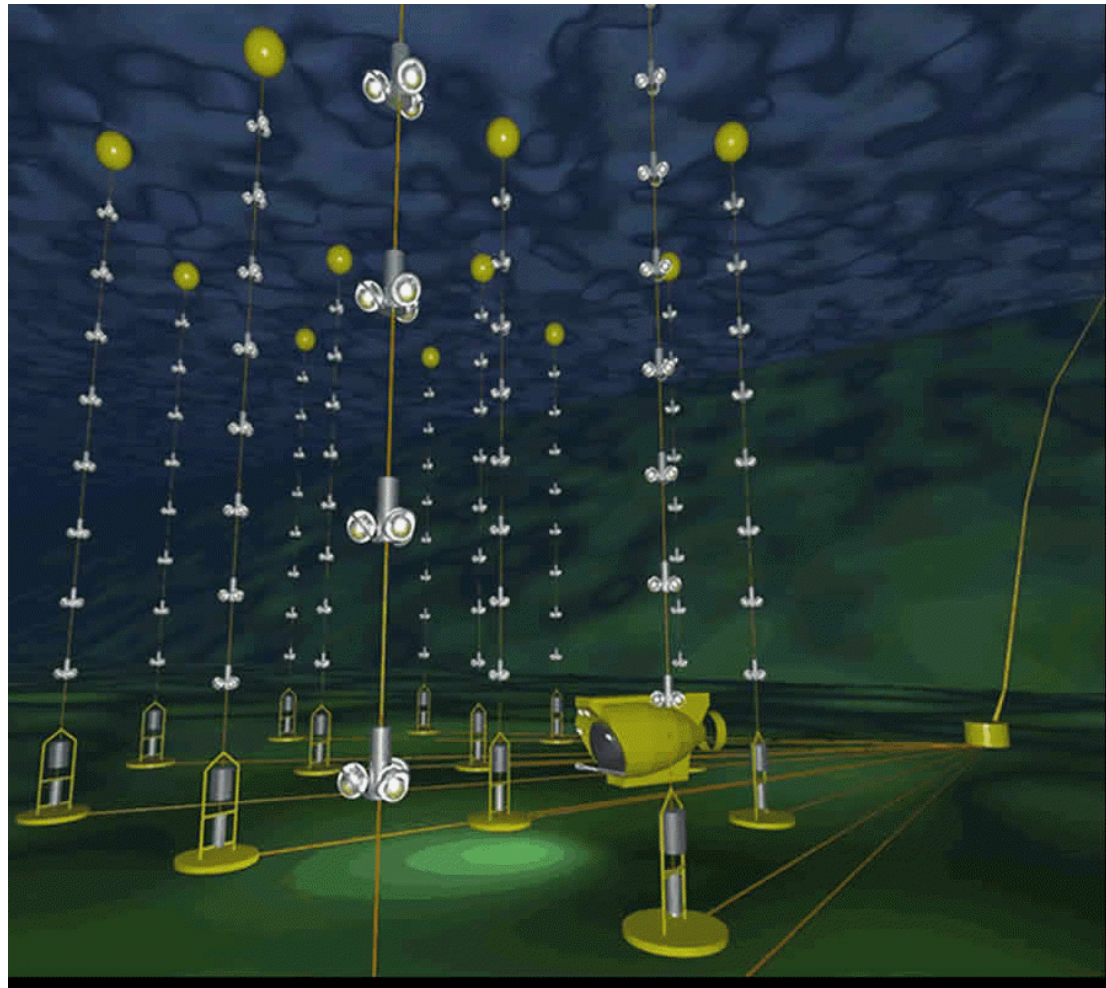
- South Pole glacier
- 1 km^3
- 5160 PMTs

Larger, sparser → higher energies

Inne eksperymenty

Antares

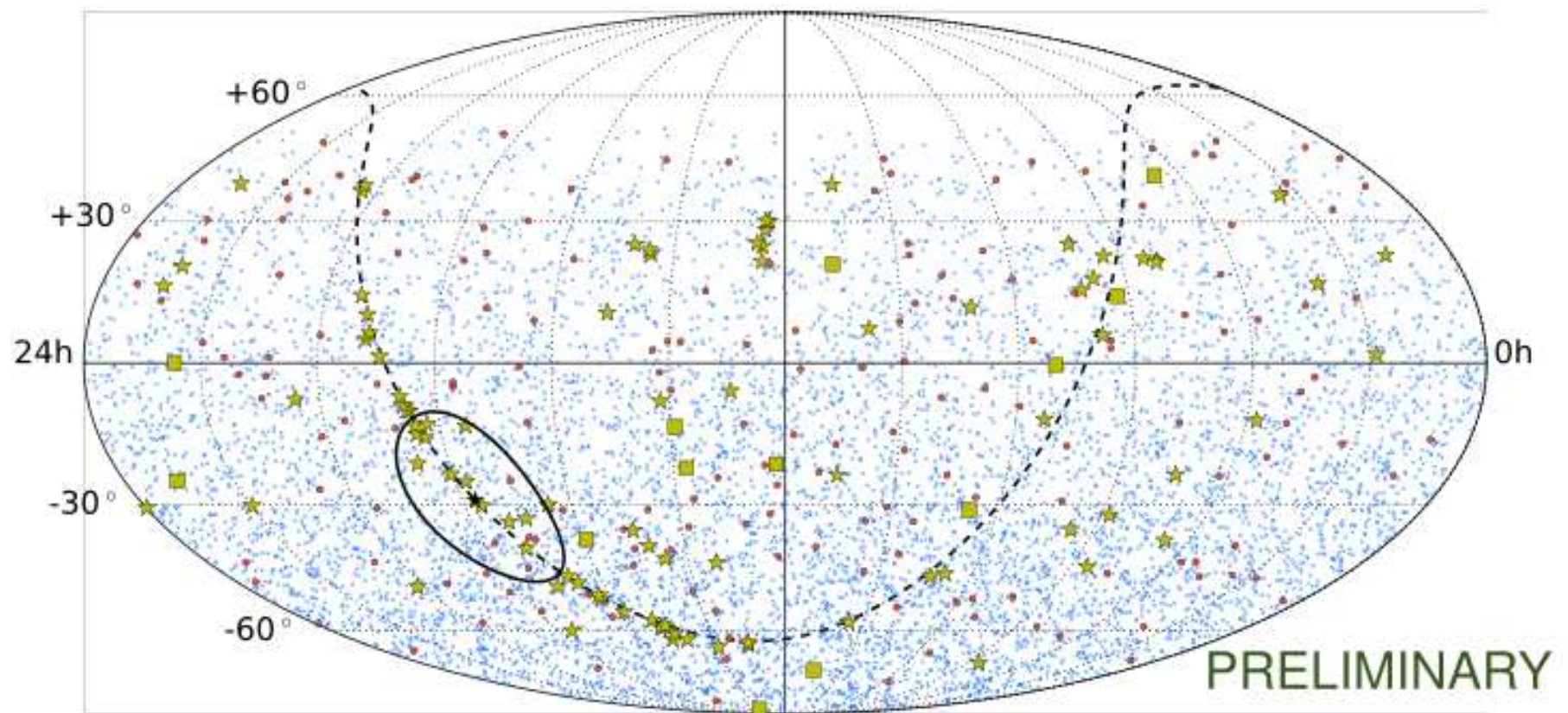
Uruchomiony 2007. 885 PM na głębokości 2.5 km



Inne eksperymenty

Antares

2007-2015: 7622 tory (●) i 180 kaskad (●)...

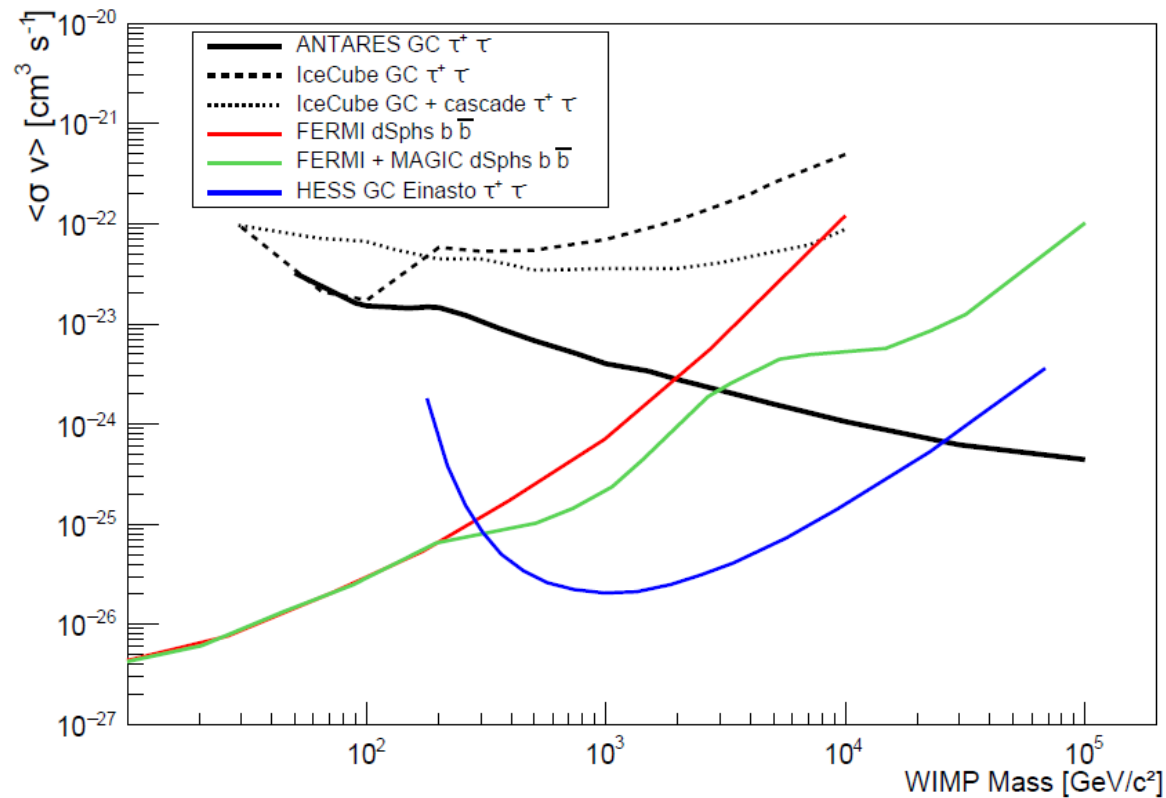


⇒ brak korelacji z położeniem znanych obiektów (GC, SNRs, pulsary...)

Inne eksperymenty

Antares

Ograniczenia na anihilację ciemnej materii w centrum galaktyki



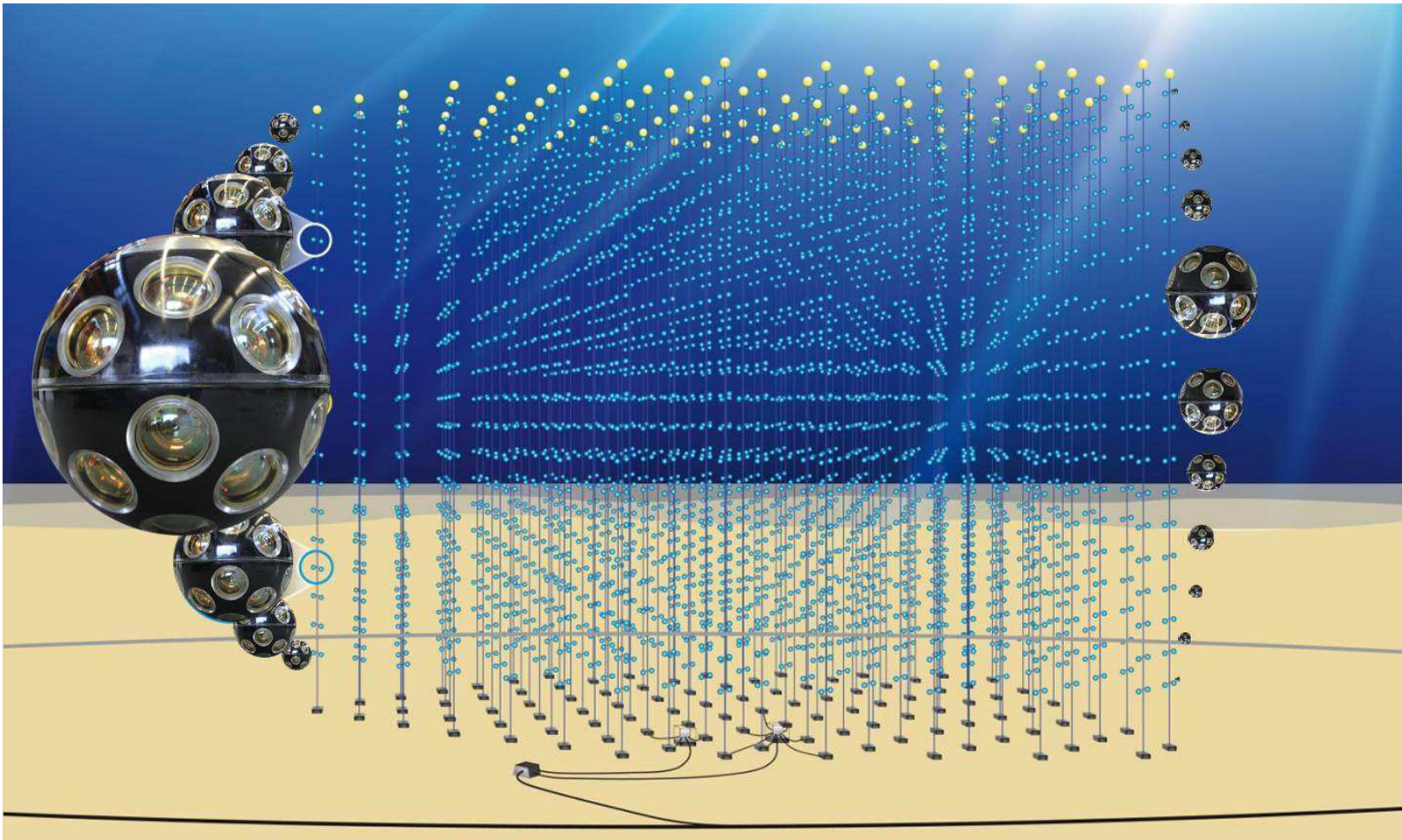
⇒ konkurencyjne z uwagi na niski próg detekcji i dobrą rozdzielczość kątową...

$$\langle E_\nu \rangle \sim M_{WIMP}/3$$

Inne eksperymenty

KM3NeT

W budowie. Francja + Włochy + Grecja. Na mapie ESFRI



Inne eksperymenty

KM3NeT

Pierwsze moduły “zatopione” na jesieni 2017...



Inne eksperymenty

ICRC'2015

Przygotowywanych jest wiele nowych projektów, także w oparciu o nowe technologie



Inne eksperymenty

- Cherenkov light detector
- Cherenkov radio detector
- Proposed Cherenkov light projects
- Proposed Cherenkov radio projects
- nu air shower proposed
- nu air shower

